

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Katedra elektroenergetiky

**Bivalentní provoz palivových a fotovoltaických článků za
účelem výroby a akumulace elektrické energie**

**Bivalent operation of fuel and solar cells for the production
and accumulation of power**

Prohlášení Studenta

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě dne 6.5.2011

Bc. Blahoslav Socha

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce panu prof. Ing. Karlu Sokanskému, CSc., který mi pomáhal a podporoval v tvorbě této práce. Stejně tak bych chtěl poděkovat panu Ing. Danielu Minaříkovi, který se také podílel na tvorbě práce a především mě provedl celým praktickým měřením v laboratoři palivových článků.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá základním popisem spolupráce fotovoltaických a palivových článků, možnosti jejich využití i ukázky funkce praktickým měření v laboratorních podmínkách. První kapitola obsahuje teoretický popis těchto zařízení. Druhá kapitola obsahuje popis hybridních systému, založených na obou těchto komponent, které se testují ve světě. Ve třetí kapitole je proveden základní návrh systému a na ní navazuje čtvrtá kapitola, která popisuje logiku řízení systému. Poslední kapitola popisuje měření na fotovoltaických a palivových článcích a rozbor výsledků.

Klíčová slova

Palivový článek, fotovoltaický článek, solární panel, elektrolyzér, akumulátor, PEMFC, DMFC, AFC, MCFC, SOFC, nízkoteplotní, vysokoteplotní, entropie, entalpie, Gibbsova energie, SAPHYS, HARI, PHOEBUS, SCHATZ

Abstract

This thesis deals with the basic description of the cooperation of photovoltaic and fuelcells, the possibility of their use, and features practical examples of measurement in laboratory conditions. The first chapter contains a theoretical description of these devices. The second chapter contains a description of hybrid systems based on both of these components are tested in the world. The third chapter is the main design of the system and it builds on the fourth chapter, which describes the logic control system. The last chapter describes the measurements of photovoltaic and fuel cells and analysis of the results.

Keywords

Fuel cell, photovoltaic cell, solar panel, electrolyser, battery, accumulator, PEMFC, DMFC, AFC, MCFC, SOFC, low-temperature, high-temperature, entropy, enthalpy, Gibbs free energy, SAPHYS, HARI, PHOEBUS, SCHATZ.

Seznam použitých symbolů a zkratek

AC	Označení střídavého proudu
AFC	alkaline fuel cell
DC	Označení stejnosměrného proudu
DMFC	Direct metanol fuel cell
E	energie (J)
F	Faradayova konstanta (96487 C/mol)
FC	fuel cell, palivový článěk
H	entalpie
I,i	elektrický proud (A)
MCFC	molten carbonate fuel cell
MEA	Membrane electrode assembly
P	Výkon (W)
PAFC	phosphoric acid fuel cell
PEMFC	proton exchange membrane fuel cell
Q	teplo
R	elektrický odpor (Ω)
S	entropie
SOFC	solid oxide fuel cell
T,t	čas (s)
U,u	napětí (V)
W	Watt
ΔG	Gibbsová volná energie

Obsah

1	POPIS FUNKCE PALIVOVÝCH A FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ	8
1.1	SLUNEČNÍ ENERGIE.....	8
1.1.1	<i>Složky slunečního záření.....</i>	<i>10</i>
1.1.2	<i>Solární konstanta.....</i>	<i>11</i>
1.1.3	<i>Fotovoltaická přeměna</i>	<i>12</i>
1.1.4	<i>Fotovoltaický článek.....</i>	<i>15</i>
1.1.5	<i>Účinnost.....</i>	<i>15</i>
1.1.6	<i>Solární článek v praxi.....</i>	<i>18</i>
1.1.7	<i>Výroba solárních panelů</i>	<i>19</i>
1.1.8	<i>Solární hospodářství.....</i>	<i>20</i>
1.1.9	<i>Typy solárních panelů</i>	<i>21</i>
1.2	PALIVOVÉ ČLÁNKY	22
1.2.1	<i>Rozdělení PČ</i>	<i>24</i>
1.2.2	<i>PEM články</i>	<i>25</i>
1.2.3	<i>Termodynamika palivových článků</i>	<i>27</i>
	<i>Úloha Gibbsovy volné energie a Nernstova potenciálu.....</i>	<i>27</i>
1.2.4	<i>Účinnost.....</i>	<i>29</i>
1.2.5	<i>Charakteristiky PEM článků.....</i>	<i>31</i>
2	ROZBOR STÁVAJÍCÍCH MOŽNOSTÍ AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE NA BÁZI PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ	33
2.1	SAPHYS	33
2.2	PHOEBUS	36
2.3	SCHATZ	40
2.4	HARI.....	41
3	NÁVRH SYSTÉMU PRO BIVALENTNÍ PROVOZ PALIVOVÝCH A FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ ZA ÚČELEM VÝROBY A AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE. MOŽNOSTI OPTIMALIZACE CHODU PALIVOVÉHO ČLÁNKU PŘI VÝROBĚ ELEKTRICKÉ ENERGIE.....	44
3.1	SOLÁRNÍ PANELY	45
3.2	PALIVOVÝ ČLÁNEK.....	49
3.3	ELEKTROLYZÉR	51
3.4	BATERIE	52
3.5	MĚNIČE NAPĚTÍ	53
3.6	NÁVRH	54
4	POPIS FUNKCE ŘÍDICÍHO SYSTÉMU – NÁVRH ZÁKLADNÍ LOGIKY	58
4.1	FUZZY LOGIKA.....	60
5	MĚŘENÍ CHARAKTERISTIK KLÍČOVÝCH KOMPONENT SYSTÉMU S AKUMULACÍ ENERGIE DO VODÍKU	63

5.1	POPIS KOMPONENT	64
5.2	VÝSTUP MĚŘENÍ	65
5.3	POPIS PŘÍLOH	68
5.3.1	Příloha 1	68
5.3.2	Příloha 2	69
5.3.3	Příloha 3	69
5.3.4	Příloha 4	69
5.3.5	Příloha 5	69
5.3.6	Příloha 6	69
5.3.7	Příloha 7	69
5.3.8	Příloha 8	69
5.3.9	Příloha 9	69
5.3.10	Příloha 10.	70
5.3.11	Příloha 11.	70
5.3.12	Příloha 12.	70
5.3.13	Příloha 13.	70
5.3.14	Příloha 14.	70
5.3.15	Příloha 15.	70
5.3.16	Příloha 16.	70
5.3.17	Příloha 17.	70
ZÁVĚR.....		71
SEZNAM TABULEK		72
SEZNAM OBRÁZKŮ.....		73
LITERATURA		74

Úvod

V současnosti prožívá sluneční energie boom. Fotovoltaické panely jsou předmětem mnoha odborných i laických diskuzí. Dalo by se říci, že se jedná o kontroverzní téma, protože tato problematika má mnoho přívrženců i odpůrců. Svého rozmachu dosáhlo využití solární energie díky zájmu o ekologickou výrobu elektrické energie. Předmětem diplomové práce však nejsou pouze solární články, ale také vodíkové palivové články. Často se o vodíku mluví, jako o palivu budoucnosti. Jedná se o prvek, který je ve vesmíru nejvíce rozšířený, ale téměř vždy je vázán s jinými prvky. Proto se řeší, aby jeho výroba byla co nejlevnější, aby se dál komerčně využívat.

Diplomová práce se tady zabývá oběma problematikami. Jedná se tedy o skloubení dvou zařízení pro výrobu ekologické energie. Tento typ hybridního systému se již testuje na některých místech a zjišťuje se jeho využitelnost a nezávislost na dodávce energie z veřejné distribuční sítě.

První kapitola se zabývá teoretickým popisem. U obou zařízení je provedeno základní rozdělení. Také nechybí základní popis, reakce a schémata. Uvedeny jsou základní rovnice, popisující vnitřní procesy.

V druhé kapitole jsou rozebrány systémy založené na fotovoltaických a palivových článcích. Jedná se o systémy, které pracují v různých podmínkách a s různou velikostí. Krom základního popisu a přehledového schéma celého systému je uveden také popis jednotlivých komponent, včetně jejich parametrů. Některé systémy jsou instalovány již pro praktické využití v testovacím režimu, jiné slouží jako experimentální pro zjištění optimálních konstrukcí pro budoucí aplikace.

Třetí kapitola se zabývá návrhem komponent pro využití solárních a palivových článků. Jednotlivé části jsou popsány a uvedeny případné možnosti, jak je využít, aby bylo dosaženo nejlepších výsledků.

V předposlední kapitole se zabývám popisem základní logiky řídicího systému. Ten je důležitý pro spolehlivý provoz.

Předmětem poslední kapitoly je praktické měření, prováděno v laboratoři na VŠB TU Ostrava. Při měření bylo použito solárních i fotovoltaických článků a také elektrolyzéru vyrábějícího vodík.

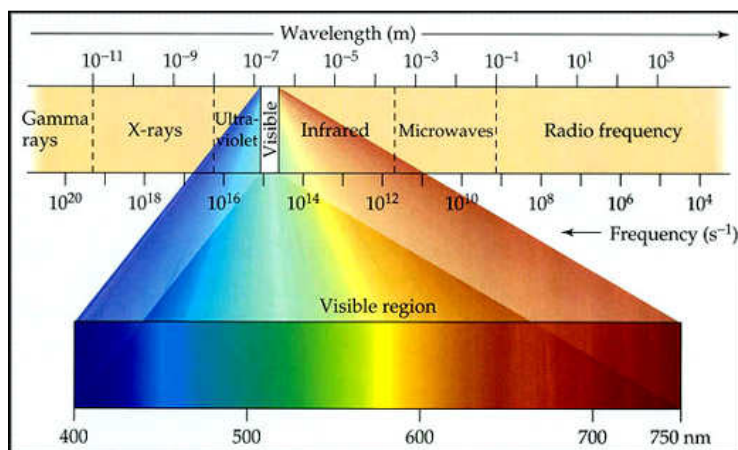
1 Popis funkce palivových a fotovoltaických článků

První kapitola se zabývá popisem palivových a fotovoltaických článků. Popsány jsou jejich hlavní parametry a aspekty, které ovlivňují jejich činnost. Palivový článek je elektrochemické zařízení, sloužící k přeměně energie ve vodíku na energii elektrickou. Fotovoltaický článek zase na elektrickou energii přeměňuje energii, která na zemi dopadá ze slunce.

1.1 Sluneční energie

Slunce zásobuje naši planetu Zemi velkým množstvím energie. Tato energie elektromagnetického (EM) záření se projevuje v několika formách. K popisu můžeme použít spektrum slunečního záření, které není tvořeno pouze viditelným světlem, ale také ultrafialovým (UV) a infračerveným (IR). Celý spektrální rozsah dopadající na Zemi je od 30 nm do 3000 nm. Oblast 400-800 nm je právě oním viditelným světlem. Energie s vlnovou délkou menší než 400 nm je UV záření, které je pro lidské oko již neviditelné. Toto záření bývá děleno do několika kategorií, podle toho jak působí na biologické organismy. Největší podíl dopadající na Zemi je UVA záření, tvořící 99% celkového UV záření. Jeho spektrum je 315-400 nm a je důležitý pro tvorbu vitamínu D. Záření s vlnovou délkou 280-315 nm je označováno jako UVB, které dopadá na atmosféru, ale skrze ní projde pouze 1%. Toto záření je už škodlivé pro živé organismy (schopno rozkládat bílkoviny) a ve větším množství může způsobovat zdravotní problémy, jako rakovinu nebo poškození očí (poškození nervových zakončení rohovky, spálení čípků a tyčinek). Posledním typem je UVC záření s délkou menší než 280 nm. Toto záření se v přirozené formě na naší planetě nevyskytuje, jelikož plynný kyslík zamezuje tomuto záření jeho průnik. UVC záření je zhoubné pro živé organismy, avšak je hojně využíváno například pro dezinfekci v nemocnicích a průmyslu, kde je třeba prokazatelně zahubit všechny formy nežádoucích, biologických forem (bakterie). S vyšší vlnovou délkou než 400 nm je už zmiňované viditelné světlo. To je známo svým barevným dělením při průchodu bílého světla skleněným hranolem.

Poslední částí slunečního spektra je infračervené záření, nebo také tepelné záření. Ve skutečnosti dochází k zahřívání povrchu těles při dopadu jakéhokoliv záření, ale při pokojových teplotách emitují tělesa tepelnou energii právě v této části spektra, proto se označuje jako tepelné záření. Jeho dělení je podobné jako UV záření (IRA, IRB, IRC). Infračerveného záření se používá pro přenos informací na krátkou vzdálenost podle standardu IrDA. Setkáme se s ním v masové míře jako dálkové ovládače k elektronickým zařízením a u mobilních telefonů.



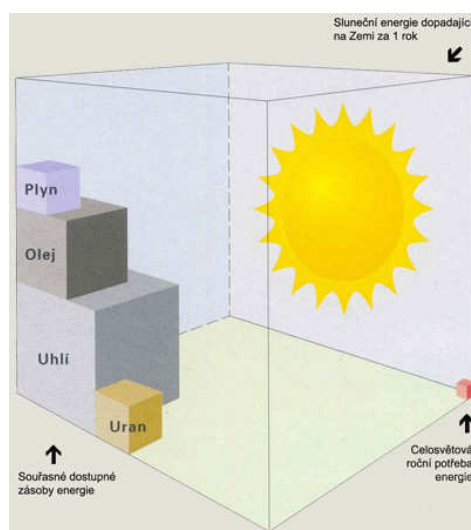
Obr. 1 Elektromagnetické spektrum

Toto představení spektrálního rozsahu Slunce je důležité pro další pochopení problematiky využití solární energie. Fotovoltaické panely totiž nereagují pouze s viditelným světlem, ale i s těmito jinými druhy záření. Především nejnovější panely jsou schopny díky několikavrstvé technologii využít velkou část tohoto spektra a zvýšit tak účinnost výroby elektrické energie. Důležitým poznatkem EM záření je jeho duální charakter, že záření je tvořeno vlnovým a částicovým charakterem. Vlnový charakter je více obsažen v záření s delší vlnovou délkou, u kratších vlnových délek je větší míře částicový charakter. Od tohoto poznatku se odvíjí energie fotonu, potřebná pro fotoelektrický jen v solárním článku, která je rozebrána níže.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

Podle tohoto vztahu je patrné, že větší energii budou mít fotony s kratšími vlnovými délkami.

[32]



Obr. 2 Porovnání velikosti dostupných energií s energií slunečního záření [33]

1.1.1 Složky slunečního záření

Vzhledem ke vzdálenosti a vzájemné velikosti Země a Slunce, dopadá na naši planetu jen velice malá část této energie, asi 2 miliardtiny. I přesto je roční úhrn této energie mnohonásobně větší, než jakou lidé během roku spotřebují. Sluneční záření, které prochází atmosférou, se setkává při cestě s překážkami ve formě aerosolů, prachů, mraků, smogu. To vede k tomu, že kromě přímého slunečního záření dopadá na zemi i difúzní záření. Přímé a difúzní záření označujeme jako složky slunečního záření. Obě složky tvoří takzvané globální záření. Zaobírat se těmito složkami je při projektování sluneční elektrárny důležité. Obě složky jsou přítomny vždycky, avšak v rozdílných poměrech. Jejich poměr je dán geografickou polohou, ročním obdobím a počasím. Při jasné letní obloze převládá přímé sluneční záření. V zimě a při zatažené obloze dosahuje difúzní složka záření velkých hodnot. Intenzita difúzního záření je sice menší, než u přímého záření, avšak přichází ze všech směrů, jelikož se jedná o odražené záření. Odraz se děje od všech předmětů, mraků apod... Dnešní moderní solární se snaží co nejvíce využívat obě složky záření. Příkladem mohou být oboustranné solární panely, které z jedné strany využívají přímé záření a z druhé strany absorbují difúzní záření, odražené od objektu za ním.

Intenzita přímého slunečního záření na plochu kolmou k dopadajícím paprskům se určí podle vztahu:

$$I_{PZ} = I_S \cdot e^{-amT} \quad (2)$$

kde I_{PZ} je intenzita přímého slunečního záření, I_S solární konstanta, a Rayleighyho koeficient, m poměrná optická tloušťka atmosféry, T Linkeho faktor znečištění atmosféry. Určit difúzní záření není jednoduché, protože může docházet k jeho častým změnám. Při bezoblačné obloze se difúzní záření určí podle vztahu:

$$I_{DZ} = (0,22 + 0,025T) \cdot (I_S - I_{PZ}) \cdot \sinh_0 \quad (3)$$

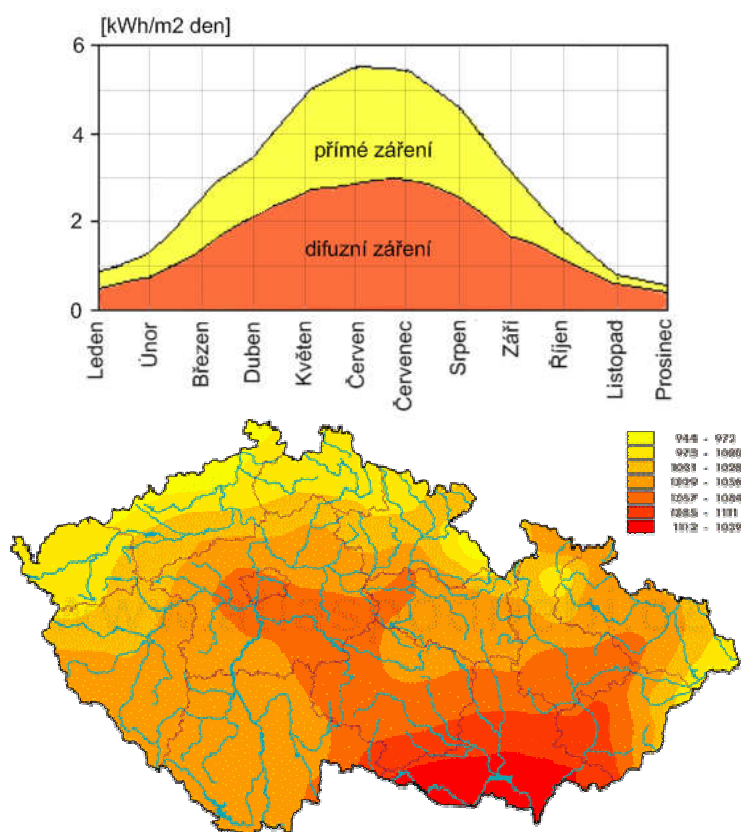
h_0 je elevační výška Slunce. Pokud je obloha zatažená použije se tento vztah:

$$I_{DZ} = (0,18 + 0,025T) \cdot I_S \cdot \sinh_0 \quad (4)$$

Záření, které se odrazí od okolního terénu, určíme takto:

$$I_O = 0,5\rho(1 - \cos \gamma) \cdot (I_{DZ} + I_{PZ} \cdot \sinh_0) \quad (5)$$

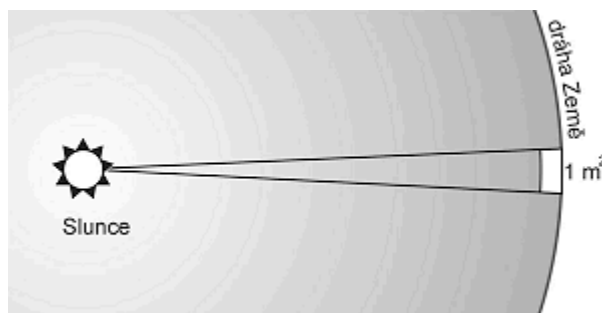
ρ je koeficient odrazivosti okolního terénu.



Obr. 3 Poměr difúzního a přímého záření (nahore) a sluneční mapa ČR (dole) [34]

1.1.2 Solární konstanta

Solární konstanta udává intenzitu slunečního záření dopadajícího na Zemi na jednotku plochy. Hodnota je vypočítána na hranici atmosféry, protože při dopadu tohoto záření dochází k částečnému odrazu záření, částečnému pohlcení a teprve zbytek představuje energii, která se dá využít. Zemská atmosféra také nepropouští celou část dopadajícího spektra a navíc v ní dochází k posunu spektra záření. Na obrázku (Obr. 4) vidíme, že na každý m^2 postavený kolmo k dopadajícím paprskům, dopadá takové množství energie, které je rovno právě solární konstantě. [27]



Obr. 4 Solární konstanta

Odvození solární konstanty:

Podle Wienova zákona určíme, že teplota povrchu Slunce je přibližně $T=5800$ K. Z toho určíme hodnotu vyzařování pro černé těleso podle vztahu:

$$M_e = \sigma T^4 \approx 6,42 \cdot 10 \frac{W}{m^2} \quad (6)$$

kde σ je Stefan-Boltzmanova konstanta. Celkový výkon přenášený zářením povrchu Slunce je:

$$P_s = M_e \cdot 4\pi r_s^2 \approx 3,91 \cdot 10^{26} W \quad (7)$$

r_s je poloměr Slunce $6,96 \cdot 10^8$ m. Z tohoto výkonu dopadá na Zemi jen malá část:

$$\Delta P_s = \frac{\pi_z^2}{4\pi R_{sz}^2} P_s \approx 1,79 \cdot 10^{17} W \quad (8)$$

r_z je poloměr Země a R_{sz} střední vzdálenost Země-Slunce. Z těchto hodnot můžeme již vypočítat solární konstantu:

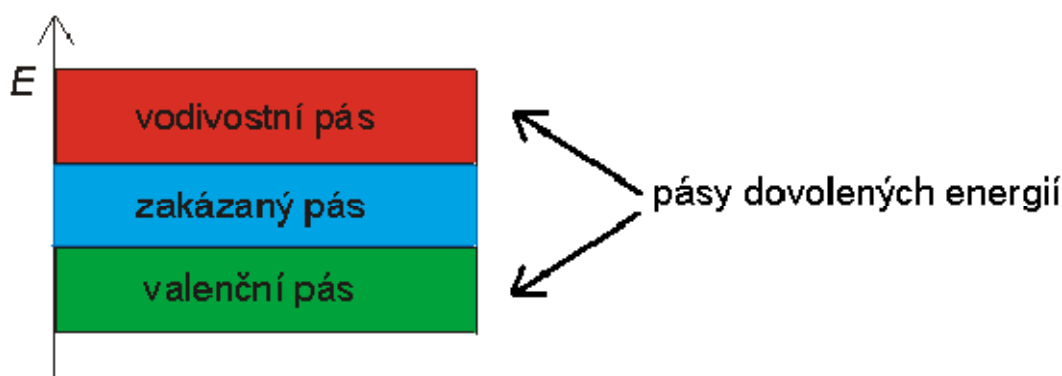
$$I = \frac{\Delta P_s}{\pi_z^2} = 1367 \frac{W}{m^2} \quad (9)$$

1.1.3 Fotovoltaická přeměna

Základem této přeměny je fotoelektrický jev, který byl pozorován H. Hertzem už v letech 1887, kdy pozoroval reakci elektromagnetického (EM) vlnění při dopadu na povrch kovu. Nepopsaný jev poprvé vysvětlil A. Einstein pomocí kvantové a Planckovy teorie. Podle ní předává EM záření energii jiným částicím ve kvantech. Velikost této energie kvanta je závislá pouze na frekvenci a určí se z následujícího vztahu:

$$E = h \cdot f \quad (10)$$

Kde h představuje Planckovu konstantu ($6,62606896 \cdot 10^{-34}$ J*s) a f je kmitočet dopadajícího záření. Toto kvantum je známo pod pojmem *foton* (světelné záření) nebo *fonon* (tepelné záření). Kvantum předá svou energii valenčním elektronům, které se mohou uvolnit a vznikne tak volný elektron, který je podmínkou pro následný tok elektrického proudu. Podle intenzity záření se uvolní méně nebo více elektronů. Aby se mohl elektron zúčastnit vedení elektrického proudu, musí mít tolik energie, aby byl schopen přejít z valenčního pásma do pásma vodivostního. Tyto dvě pásma se označují jako pásy dovolených energií. Mezi nimi je pás zakázaných energií.



Obr. 5 Pásky energií v polovodiči

Polovodiče můžeme obecně rozdělit na vlastní a nevlastní. Za vlastní se považuje polovodič, neobsahující žádné příměsi. Je tvořen pouze jedním prvkem. Následující popis se bude týkat krystalického křemíku, který se pro výrobu fotovoltaických článků používá nejčastěji. Nevlastní polovodič obsahuje kromě křemíku taky příměs ve formě jiného prvku, a to takového, který má ve valenční vrstvě o jeden elektron méně nebo více. Nevlastní polovodič N (negative) má větší koncentraci volných elektronů. Typ P (positive) má naopak větší počet kladných děr (absence elektronů, nosičem je kladný náboj)

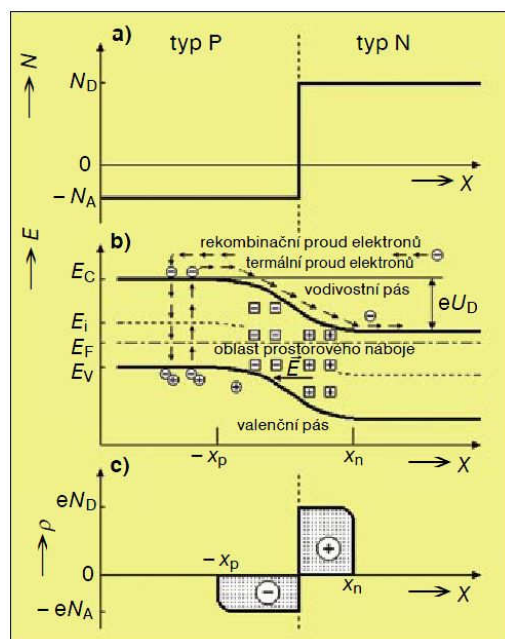
Atom čistého křemíku obsahuje 14 elektronů, z toho 4 jsou ve valenční vrstvě. Ty tvoří se sousedními atomy kovalentní vazby. Křemík krystalizuje v plošně centrované kubické soustavě. Elektrony ve valenční vrstvě mohou nabývat určitých hodnot energií. Tyto energie se vyskytují v pásmech dovolených energií (Obr. 5), které jsou odděleny pásmem zakázaných energií. Nejvyšší hladinu valenčního pásu označujeme E_v , nejnižší hladinu vodivostního pásu značíme zase E_c . Šířku zakázaného pásma vypočteme jednoduše jako rozdíl těchto hladin:

$$\Delta E_G = E_c - E_v \quad (11)$$

Tato hodnota nám říká, jak velkou energii potřebuje elektron, aby mohl přes toto pásmo přejít. Křemík má šířku zakázaného pásma 1,1 eV. Elektrony umístěné ve valenčním pásu nemohou vést elektrický proud. Po dodání energie, může elektron přejít z valenčního pásu do vodivostního. Na jeho místě tak zůstane kladná díra, kterou zaplní buď jiný volný elektron, nebo elektron ze sousedního atomu. Tak se díra posunuje z atomu na atom a to ve směru intenzity elektrického pole. Volné elektrony se pohybují v opačném směru. U vlastních polovodičů při vzniku jednoho volného elektronu, vznikne jedna kladná díra.

Jak bylo výše zmíněno, nevlastní polovodič obsahuje příměsový prvek s jiným počtem valenčních elektronů. U nevlastního polovodiče typu N nahradíme v krystalické mřížce atom křemíku prvkem z V. skupiny periodické tabulky prvků (As, P, Sb). Jedná se o prvky mající ve valenční vrstvě 5 elektronů, tedy o jeden více než křemík a označují se jako donory. Čtyři elektrony příměsového prvku jsou pak vázány kovalentními vazbami na atom křemíku. Pátý elektron je vázán slabě a k jeho uvolnění stačí malá energie. Pokud místo pětimocného prvku nahradíme křemík trojmocným prvkem ze III. Skupiny periodické tabulky (Al, B, Ga),

obdržíme polovodič typu P. Prvky z této skupiny mají ve valenční vrstvě pouze 3 elektrony, takže jedna vazba bude nezaplněna a na místě kde chybí elektron, bude nyní kladná díra. Pro fotovoltaické panely se používají oba typy nevlastních polovodičů, které se spojují do polovodičového přechodu NP. Tento přechod je nehomogenní, protože obsahuje dvě oblasti (N a P) s různou koncentrací volných nosičů nábojů (elektronů a děr). Podle zákonů difúze dochází k vyrovnávání této nerovnosti. Z oblasti s vyšší koncentrací jedněch volných nosičů nábojů se tyto nosiče přesouvají do oblasti s nižší koncentrací.



Obr. 6 Model PN přechodu

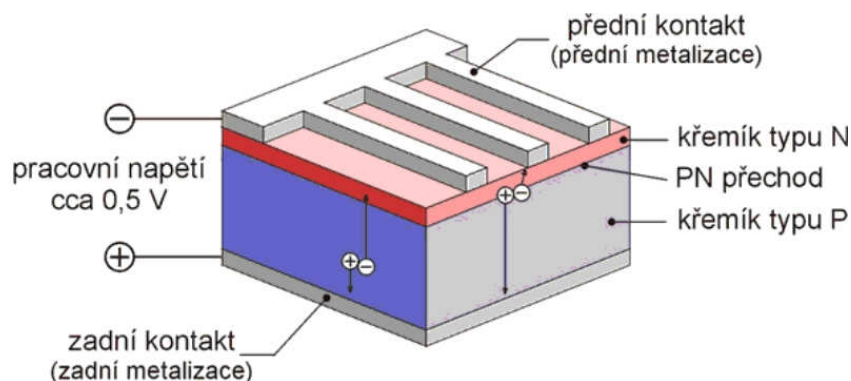
Na obrázku (Obr. 6) je vidět model PN přechodu. Šířka přechodu je ohraničená body x_p a x_n . N_D je počet volných děr, N_A počet volných elektronů. Potenciálový rozdíl mezi oběma oblastmi ukazuje difúzní napětí U_D . Při teplotách vyšších než 0 K se neustále vytvářejí volné elektrony a kladné díry a přechodem neustále tečou proudy v obou směrech. Některé elektrony v oblasti N mohou dosahovat takových energií, že mohou přeskočit do oblasti P a tam se rekombinovat s volnými děrami. Takovýto proud elektronů je nazýván rekombinační. V oblasti P vznikají zase volné páry elektron-díra. Tyto elektrony jsou elektrickým polem urychlovány do oblasti N. Tento proud elektronů se nazývá termální (difúzní). Tyto dva proudy jsou stejné, ale opačné, takže navenek se nám tyto proudy neprojeví. Pokud uzavřeme elektrický obvod (připojíme zátěž) tím způsobem, že na polovodiči P bude anoda, dojde k porušení rovnováhy obou výše zmíněných proudů a velikost difúzního napětí klesne o ΔV . Pak převládne tok elektronů směrem do polovodiče P a děr opačně. Při takovéto konfiguraci je PN přechod orientován v propustném směru. Zaměněním polarity bude přechod v závěrném směru.

[4,14]

1.1.4 Fotovoltaický článek

Solární článek je tvořen diodou s PN přechodem s velkou plochou, kladnou a zápornou elektrodou. Ve skutečnosti je ještě opatřen různými ochrannými a antireflexními vrstvami. PN přechod představují dva nevlastní polovodiče. U polovodiče typu N je majoritním nosičem elektron, u typu P je to volná díra. Takže typ N je má záporný náboj a typ P kladný náboj. V současnosti nejpoužívanější forma křemíku je krystalický křemík. Ten má v elektronovém obalu 14 elektronů, z nichž 4 jsou ve valenční vrstvě.

Pokud na tento článek dopadne záření, menší než výše zmiňovaných 1,1 eV, nedojde k žádné reakci. Pokud bude tato energie větší, začne tento přechod produkovat páry elektron-díra. Při vzniku tohoto páru, dojde k napěťovému rozdílu mezi elektrodami a pokud připojíme mezi elektrody zátěž, bude ji procházet stejnosměrný elektrický proud o velikosti, odpovídající ploše článku a intenzitě záření. [4]



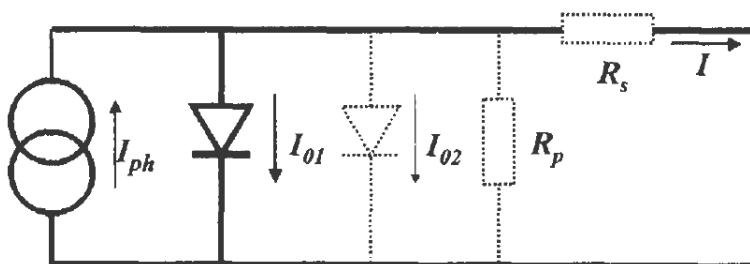
Obr. 7 Fotovoltaický článek

1.1.5 Účinnost

Ideální solární článek můžeme nahradit zdrojem proudu a paralelně zapojené polovodičové diody, tak jak je to vidět na obrázku (Obr. 8). Odpovídající AV charakteristika je pak popsána Shockleyho rovnicí:

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) \quad (12)$$

Kde k_B je Boltzmannova konstanta, T je absolutní teplota, q (>0) je náboj elektronu a V je napětí na svorkách článku. I_0 je znám jako saturační proud diody. Ve tmě se solární článek chová jako obyčejná polovodičová dioda. Fotogenerovaný proud I_{ph} souvisí s fotony dopadajícími na článek, a jeho závislost na vlnové délce je spojena s kvantovou účinností. Tento proud je většinou nezávislý na napětí. Výjimku tvoří pouze články z amorfního křemíku, nebo články tenkých filmových materiálů.



Obr. 8 Náhradní obvod fotovoltaického článku

Na dalším obrázku (Obr. 9) je ukázaná VA charakteristika solárního článku. V ideálním případě se proud nakrátko I_{sc} rovná proudu I_{ph} a napětí naprázdno V_{oc} je dáno:

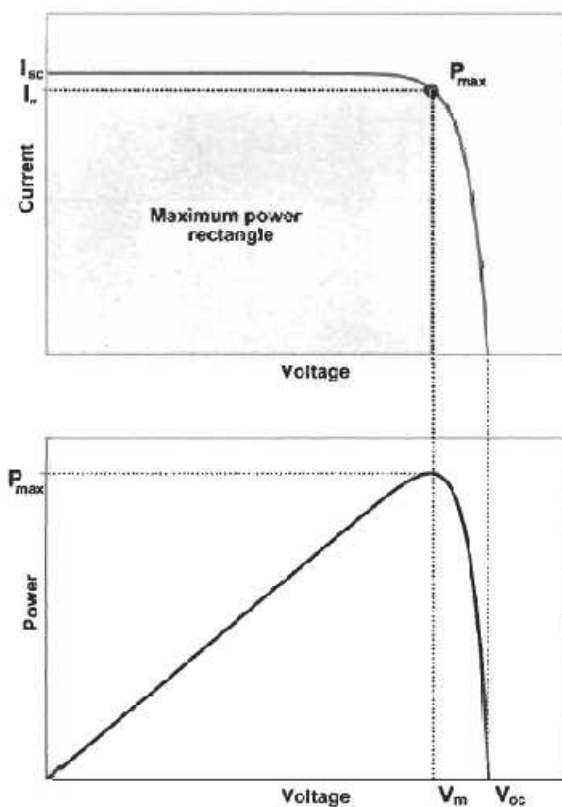
$$V_{oc} = \frac{k_B T}{q} \ln \left(1 + \frac{I_{ph}}{I_0} \right) \quad (13)$$

Výkon P je také zobrazen na obrázku (Obr. 9). Článek generuje maximální výkon P_{max} při napětí V_m a proudu I_m , proto je vhodné definovat faktor plnění FF.

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} = \frac{P_{max}}{I_{sc} V_{oc}} \quad (14)$$

Faktor plnění u ideálního článku má index 0. FF_0 závisí pouze na poměru $v_{oc} = V_{oc} / k_B T$ a je určen s vynikající přesností. Přibližný vztah pro výpočet je následující.

$$FF_0 = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0,72)}{V_{oc} + 1} \quad (15) \quad [2]$$

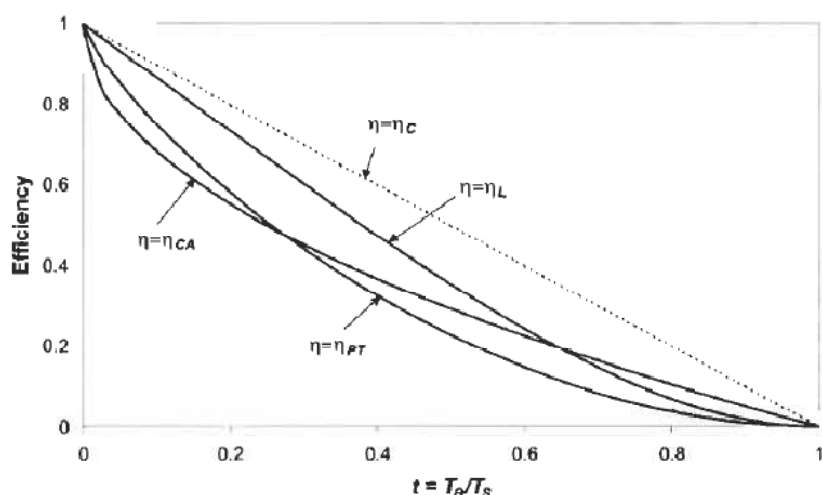


Obr. 9 VA charakteristika (nahore) a výkonová charakteristika (dole)

Účinnost fotovoltaického článku je dána účinnostmi, které jsou tyto:

- $\eta_C = 1 - T_a / T_s = 95\%$ - účinnost Carnotova cyklu
- $\eta_{CA} = 1 - (T_a / T_s)^{\frac{1}{2}} = 77\%$ - Curzon-Ahlbornová účinnost
- $\eta_L = 1 - (4/3)(T_a / T_s) + (1/3)(T_a / T_s)^4 = 93\%$ - Landsbergová účinnost
- $\eta_{PT} = [1 - (T_a / T_s)^4] \cdot [1 - (T_a / T_c)] = 85\%$ - foto-termální účinnost

Kde T_a je teplota okolí, T_s teplota slunce a T_c teplota článku, uskutečňující přeměnu energie.



Obr. 10 Jednotlivé účinnosti ovlivňující celkovou účinnost

1.1.6 Solární článek v praxi

Ampér-Voltová charakteristika skutečného solárního článku se obvykle liší od ideálního. V praxi se často používá dvou-diodový model (Obr. 8) k porovnání charakteristik. Solární článek může obsahovat sériový R_s , nebo paralelní R_p odpor, což vede k odlišné charakteristice.

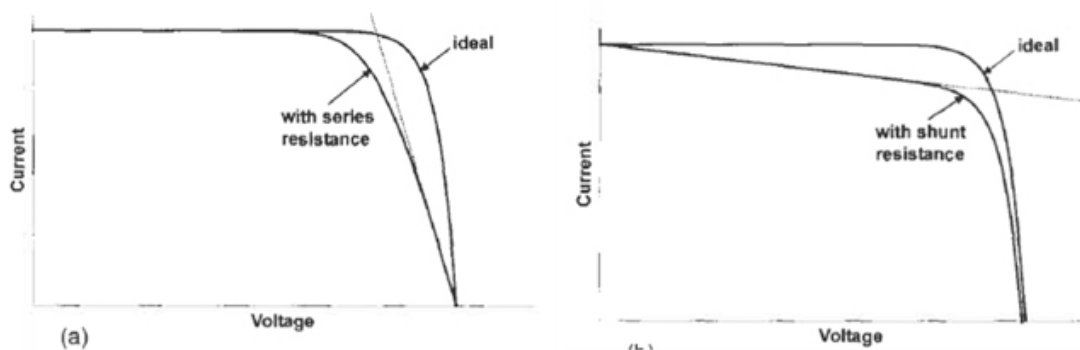
$$I = I_{ph} - I_{01} \left\{ \exp \left(\frac{V + IR_s}{k_B T} \right) - 1 \right\} - I_{02} \left\{ \exp \left(\frac{V + IR_s}{2k_B T} \right) - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (16)$$

Kde zářením generovaný proud I_{ph} může v některých případech záviset na napětí. Model skutečného článku s druhou diodou a oběma odpory je uveden na obrázku (Obr. 11) tečkovaně. Na obrázku je na levé křivce znázorněn účinek sériového odporu, zařazeného do obvodu ideálního článků. Na pravé křivce je znázorněn stav při zařazení pouze paralelního obvodu. Účinek odporu na faktor plnění FF se vyjádří následovně.

$$FF = FF_0 \left(1 - R_s \frac{I_{sc}}{V_{oc}} \right) = FF_0 (1 - r_s) \quad (17)$$

Podobný vztah platí i pro paralelní odpor:

$$FF = FF_0 (1 - r_s) \left[1 - \frac{(V_{oc} + 0,7) FF_0 (1 - r_s)}{V_{oc} r_p} \right] \quad (18) \quad [2]$$



Obr. 11 Vlivy odporů na VA charakteristiku

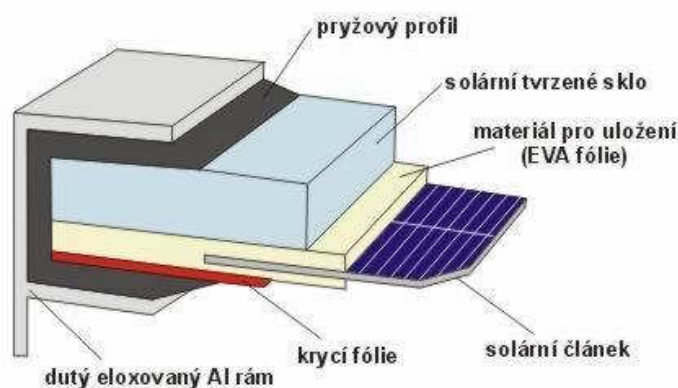
1.1.7 Výroba solárních panelů

Pro fotovoltaické panely se používá především krystalický křemík. V dnešní době se už hodně začíná používat panelů z amorfního křemíku. Křemík jako prvek je hojně zastoupený v zemské kůře. Je to druhý nejrozšířenější prvek na Zemi. Z polovodičových prvků je nejvíce prozkoumaný. Jeho hlavními výhodami jsou, že je levný, dostupný a nejdovatý.

Surový křemík se vyrábí z křemenného písku v obloukové peci společně s koksem (redukce uhlíkem). V peci se při teplotě 2000°C odlévá křemík v hutní kvalitě s čistotou 99 %. K výrobě fotovoltaických panelů není třeba takové čistoty křemíku, jako se používají k výrobě integrovaných obvodů. V dnešní době se křemík vyrábí především technologií Siemens s chlоровým cyklem. Tento proces je však náročný na spotřebu elektrické energie a přítomnost chlóru vede zajištění bezpečnosti, před účinky na obsluhu i životní prostředí. Takto se dostaneme k hrudkám křemíku, na kterých se testuje elektrický odpor. Z těchto hrudek se dále vytvoří ingoty. Ty se vyrábí už jednodušeji. Stačí hrudky křemíku roztavit a nalít do formy, ve které se pomalu a řízeně chladí. Vzniklý ingot pak nařeže na destičky o tloušťce 100 μm . Jelikož je solární článek tvořen PN přechodem, musí se tento přechod vytvořit ve speciálních difúzních pecích. Pomocí difúze se na destičky křemíku nanášou příměsi, které vytvoří polovodičový přechod.

Na přední stranu se následně nanášou antireflexní vrstvy. Ty zvyšují účinnost článku a poznáme je tak, že se nám jeví, jako černé. Horní kontakt je tvořen hřebínkem nebo mřížkou tak, aby co nejméně omezoval účinnou plochu. U speciálních aplikací je kontakt vnořen přímo do křemíkové destičky. Tato metoda je však velmi drahá a náročná. Kontakt na spodní straně je u klasických panelů tvořen celoplošným, kovovým spojením.

Jednotlivé články se do panelů skládají sérioparalelní kombinací. Výsledný panel tvoří speciální temperované sklo, chránící před mechanickým poškozením. Samotný článek je vložen mezi dvě EVA fólie. Po vysátí vzduchu jsou obě fólie roztaveny. Tím se článek zalije touto hmotou. Všechno je pak uzavřeno do hliníkového rámu, utěsněného pryží nebo silikonem. Hotový panel je vodě a prachu odolný. [4]



Obr. 12 Konstrukce fotovoltaického panelu

1.1.8 Solární hospodářství

V současnosti, kdy ekologie zažívá svůj boom, je jako jedna z alternativ konvenčních elektráren označována právě fotovoltaika. Na veřejné mínění má vždy pozitivní efekt jaké klady má daná technologie. Z hlediska hospodářského je třeba brát v úvahu i negativní dopady a jejich vzájemné porovnání za účelem určení efektivnosti výroby elektrické energie. Takováto analýza se týká i fotovoltaických panelů. Je pravdou, že jejich údržba a spotřeba energie při provozu je minimální, ale solární elektrárna musí vyrovnat energetický deficit, který získala při výrobě nejen samotných solárních článků, ale i podpůrných systému jako jsou měniče, akumulátory, trackery, upevňovací konstrukce... . Následující zjednodušený příklad pomůže pochopit návratnost vynaložené energie:

Tabulka 1 – Energetická náročnost výroby fotovoltaických panelů

	Standardní technologie	Tenkovrstvá technologie
Surovina (křemík)	450 kWh	5 kWh
Solární články	40 kWh	-
sklo	10 kWh	20 kWh
Umělá hmota	8 kWh	8 kWh
Hliníkový rám	80 kWh	80 kWh
teplo	3 kWh	10 kWh
Celkem	591 kWh	123 kWh

U standardní technologie se jedná o 55W solární panel firmy ARCO s účinností 12 % a ploše 0,4 m². Pokud instalujeme takovýto panel na místo, kde je střední globální záření 3,2 kWh/m²d, pak můžeme vypočítat, kolik energie tento panel vyrobí za rok:

$$0,4 \cdot 365 \cdot 3,2 \cdot 0,12 = 56 \text{ kWh/rok} \quad (19)$$

Na výrobu bylo spotřebováno 591 kWh, tak spočítáme za jak dlouho bude tato energie, solárním panelem, vrácena:

$$\frac{591}{56} = 10,5 \text{ roků} \quad (20)$$

Bude tedy trvat 10,5 roků, než solární panel vyrobí tolik energie, kolik bylo spotřebováno na jeho výrobu. Pokud by byl instalován na Sahaře, bude tato návratnost kolem 4 let.

Podobný výpočet můžeme udělat i u tenkovrstvé technologie. Plocha, v tabulce udávaného, panelu je 0,48 m², účinnost 6,5 % a výkon 30 W. Výpočet a návratnost tedy bude:

$$0,48 * 365 * 3,2 * 0,065 = 36,44 \text{ kWh/rok} \quad (21)$$

$$\frac{123}{36,44} = 3,4 \text{ roků} \quad (22)$$

Tyto výpočty se týkají pouze výroby samotných panelů. K tomu se připočte ještě energie vynaložená na výrobu ostatních komponent, a energie vynaložená na likvidaci (recyklaci). Tím se zvýší i návratnost energie. [20]

1.1.9 Typy solárních panelů

Solární panely prošly během svého života mnoha vývoji a vyráběly se různými technologiemi. Dělit je můžeme podle několika kritérií. Často se toto dělení řeší tak, jak se postupem času vyvíjela technologie. Tento vývoj se dá rozdělit do čtyř generací, které zde budou popsány.

Do první generace patří solární články, které fungují na základě křemíkové destičky, tvořící plošný PN přechod. Destičky jsou vyrobené z monokrystalického křemíku. Výroba těchto panelů je sice drahá, avšak jejich účinnost je poměrně vysoká. V současné době tvoří většinu vyrobených panelů (90 %). I přes to že tato technologie je komerčně nejstarší, počítá se s ní i do blízké budoucnosti.






Druhou generací byly články, u kterých byla snaha snížit výrobní náklady a tak více zpřístupnit fotovoltaické panely. Tato úspora se týkala hlavně úsporou křemíku. Úspora byla docílena tím, že panely se začaly vyrábět ze slitin křemíků, do kterých se přidávaly jiné prvky (Cu, In, Ga, S, Se). Také se vyráběly panely z polykrystalického, mikrokystalického nebo amorfního křemíku. Tyto panely se vyznačují svou tenkostí (100-1000 krát tenčí aktivní polovodičovou vrstvou). Díky tomu se uplatňují v místech kde je potřeba přizpůsobit panel nějakému tvaru a podobně. Nevýhoda však spočívá v horší účinnosti a stabilitě.

Tyto dvě generace tvoří v současnosti naprostou většinu komerčně nabízených solárních panelů. Monokrystalické panely se umísťují na jih, nejlépe na střechy. Používají se u nich polohovací jednotky – trackery, které zvyšují výkon natáčením panelu ke slunci. V současné době dosahují panely výkonu až 315 Wp. Životnost se pohybuje kolem třiceti let, s tím, že po deseti letech je garantován výkon 90 % z původního výkonu a po dvaceti letech 80 %. Polykrystalické panely, jsou vhodné pro střechy i pro instalaci na pozemku. Na stejný výkon je třeba u polykrystalických panelů potřeba větší plochy, než u monokrystalických. Avšak

dokážou lépe zpracovat i difúzní záření, takže nemusejí být pouze na jih, ale i na jiné světové stany. Maximální dosahovaný výkon je 260 W na panel. Životnost je podobná jako u monokrystalických panelů. Tenkovrstvé panely jsou levnější než krystalické panely a mají větší výkon při ozáření difúzním světlem, ale jejich plocha je přibližně 2,5 krát větší, při uvažování stejného výkonu.

Třetí generace solárních článků se zaměřuje na maximalizaci absorpce fotonů dopadajících na panel a také na maximalizaci využití energie těchto fotonů. Toho se dá docílit několika způsoby, ale nejvíce využívaná je vícevrstvá technologie. Tato technologie dovoluje absorbovat v každé vrstvě určitou část spektra a tak využít najednou velkou šířku spektra dopadajícího záření. [21]

Tabulka 2 – Potřebná plocha pro výrobu 1 kWp pro různé technologie [28]

Materiál buňky	Účinnost modulu	Potřebná modulová plocha pro 1 kW _p
Monokrystalický	11–18 %	7–9 m ² 
Polykrystalický (EFG)	10–14 %	8–9 m ² 
Polykrystalický	8–10 %	9–11 m ² 
Tenká vrstva: měď-indium-Diselenid (CIS)	6–8 %	11–13 m ² 
Tenká vrstva: Amorfni	4–7 %	16–20 m ² 

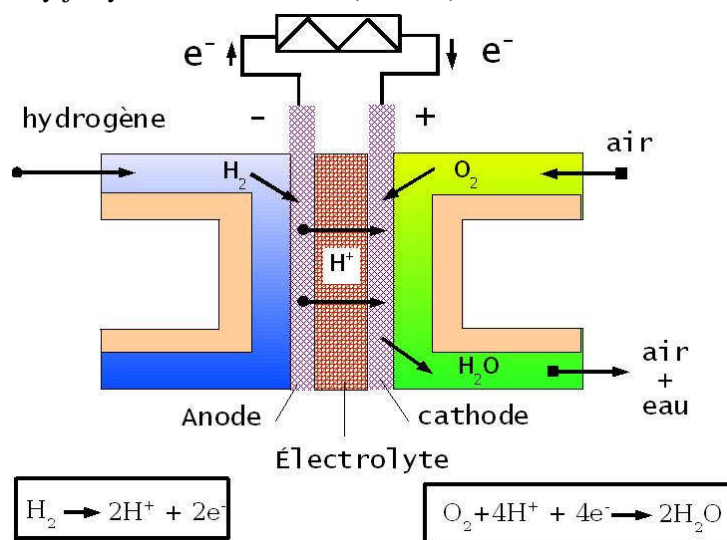
1.2 Palivové články

Další alternativním zdrojem elektrické energie, se kterým se počítá do budoucna, je palivový článek. I když se do podvědomí veřejnosti dostal teprve nedávno, princip činnosti je znám už od roku 1838, kdy ho objevil Švýcar Christian Friedrich Schönbein. Jednalo se však pouze o teoretický popis. První model sestrojil William Grove. V roce 1867 předvedl Werner Siemens první prakticky fungující dynamo a palivové články upadl do zapomnění. Až v roce 1959 předvedl Francis Thomas Bacon 5kW palivový článek. Největší rozvoj palivových článků nastal s příchodem kosmického výzkumu. Jeho vlastnosti byly výhodné pro použití v kosmických lodích a současně i v raketoplánech. Kromě netoxického provozu, bylo možno využít i odpadní vodu.

V dnešní době existuje několik typů palivových článků, které mohou jako palivo používat nejen vodík, ale i fosilní paliva nebo líh. Také aplikací je nepřehledné množství. Ve vývoji jsou velké jednotky sloužící jako zdroj energie pro průmysl nebo obytné zóny. Také v dopravě se s nimi

začalo experimentovat a na cestách se pohybují jak osobní automobily, tak i autobusy a jiné prostředky veřejné dopravy. Dokonce i spotřební elektronika, jakou jsou mobilní a telefony a notebooky je možno pomocí nich napájet. U těchto malých zařízení se uvažuje o článcích pracujících s lihovým palivem.

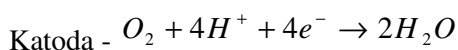
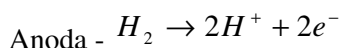
Palivové články jsou elektrochemická zařízení, které chemickou cestou přeměňují energii obsaženou v palivu na energii elektrickou. Děje se tak při oxidačně-redukční reakci paliva a okysličovadla. Při této reakci vznikají volné elektrony, které se odvádí obvodem mimo palivový článek. Takto vznikne elektrický proud, který se odvádí z elektrod. Jedná se opačný proces, než je elektrolýza. I přes fakt, že existuje několik různých druhů palivových článků, jejich princip je ve všech stejný, který je vysvětlen na obrázku (Obr. 13).



Obr. 13 Popis funkce palivového článku

Na anodu přivádíme palivo, které se za přítomnosti katalyzátoru dělí na kationty a na volné elektrony. Tyto volné elektrony jsou odváděny vnějším okruhem pomocí elektrod, přes zátěž. Kationty paliva prochází přes elektrolyt směrem ke katodě. Tam reagují s okysličovadlem za vzniku odpadní vody a tepla. Jak bylo řečeno, přes elektrolyt prochází pouze kationty, to znamená, že musí být izolantem pro volné elektrony, vzniklé při reakci.

Pro chemický popis reakcí jsou uvedeny tyto rovnice:



V palivovém článku vznikají na jednu dvouatomovou molekulu vodíku dva volné elektrony.

Jako palivo se v palivových článcích používá nejčastěji čistý vodík, jehož výhoda je, že se rovnou může zúčastnit reakce. Vzhledem k tomu, že vodík je pro některé aplikace nevhodný, pro jeho složitou skladnost a nebezpečnost, používají se takzvaná nepřímá paliva. Pod tímto pojmem jsou uváděna paliva, ze kterých se vodík uvolňuje za pomoci reformátoru. Mezi tyto paliva patří například zemní plyn, metan, metanol, etanol, čpavek, ale také hydrazin. Při použití

těchto paliv vznikají kromě čistého vodíku také nečistoty, například oxid uhelnatý, který je nebezpečný pro platinové katalyzátory. Oxid uhelnatý se silně váže na platinu při teplotách nižších než 150 °C. Proto se jeho obsah téměř netoleruje. Je potřeba před palivový článek V současné době je ve velkém vývoji palivový článek na metanol, který je bezpečný pro provoz, snadno se skladuje a není jej potřeba jakkoliv upravovat. Může se tedy přímo zúčastňovat reakce uvnitř palivového článku. [1,5,15]

1.2.1 Rozdělení PČ

Rozdělit palivové články můžeme podle několika kritérií.

Podle pracovní teploty:

- Vysokoteplotní
- Středoteplotní
- Nízkoteplotní

Podle iontové vodivosti:

- Kationová
- Aniontová

Podle elektrolytu:

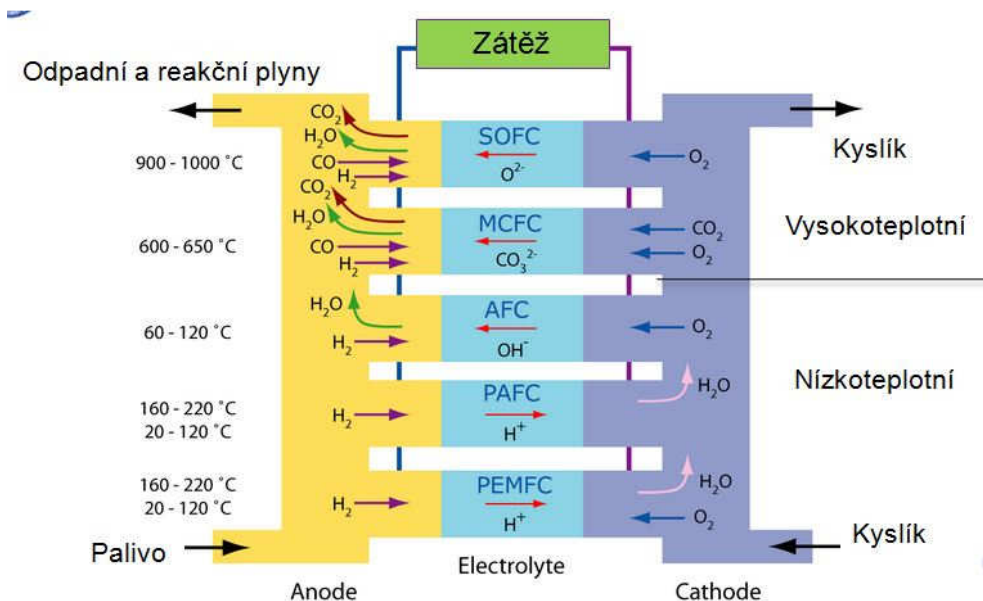
- AFC – Alkalické palivové články. Elektrolytem je hydroxid draselný
- PEMFC – tuhý polymerový elektrolyt
- PAFC – elektrolyt z kyseliny fosforečné
- MCFC – elektrolyt tvořen roztavenými uhličitany
- SOFC – elektrolyt z oxidů kovů

Podle použitého paliva:

- Čistý vodík
- Fosilní paliva
- Láh

Pro názornější ukázkou rozdělení je uveden následující obrázek (Obr. 14).

[1,5,15,24]



Obr. 14 Grafické rozdělení palivových článků

1.2.2 PEM články

Články PEM s tuhým polymerovým elektrolytem jsou dnes asi nejvíce vyvíjeny a nasazovány do praktických aplikací. Jejich výhodou je jejich nízká pracovní teplota a nízkoteplotní odpadní voda. Také mají vysokou hustotu výkonu na vzhledem k hmotnosti, což je atraktivní pro použití mobilních a přenosných zařízení.

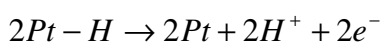
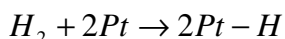
Technologie těchto palivových článků je poněkud odlišná od ostatních typů, protože je v ní použit tuhý polymerový elektrolyt. Takovýto elektrolyt má také funkci jako separátor, sloužící pro k oddělení iontů, vzniklých při reakci. U jiných druhů článků se tyto separátory vyrábějí z kovu.

Díky své nízké provozní teplotě mohou být systémy s těmito palivovými články méně složitější, jelikož odpadá požadavek na náročné chlazení, těsnění a speciální montáž.

Přestože jsou tyto články vyráběny pro provoz s čistým vodíkovým palivem, je možno u nich použít i reformovaná paliva, především moderně nasazovaného metanolu. Tyto články se označují DMFC (Direct metanol fuel cell), a jejich přínos je hlavně pro mobilní telefony, notebooky, fotoaparáty a jiné podobné zařízení. Okysličovadlem je kyslík ve formě atmosférického vzduchu.

Protonová membrána MEA (Membrane electrode assembly). Tato membrána je tvořena tuhým polymerem zajišťující iontovou vodivost. První membrány byly tvořeny krom polymeru a katalyzátoru, také silnými kyselinami, které během se během vývoje ukázaly jako nepotřebné a v dnešní době se používají pouze hydratované membrány. Ta se však nesmí během provozu nikdy vyschnout, jinak by popraskala a ztratila by tak svou funkci. Proto je potřeba, aby plyny, které jsou přiváděny k reakci, byly předem zvlhčeny. Množství vody, které je plyn schopen pojmout je závislé na teplotě. Ta se většinou pohybuje na stejné hodnotě, při jaké palivový

článek pracuje. Tím je zajištěno, že v něm nedochází ke kondenzaci vody, zapříčiňující snížení účinnosti vlivem zanášení aktivní oblasti vodou. Velký zájem o tyto články vedl k vývoji stále dokonalejších elektrolytů, aby se zvýšil výkon a staly se cenově dostupnějšími. V laboratorních podmínkách byly prováděny nepřetržité testy na stacionárních jednotkách, které ověřovaly stupeň degradace elektrolytu během života. Během dvaceti tisíc odpracovaných hodin byla degradace 0,67-1%/1000 hodin. Standardem je však hodnota 0,1%/1000 hodin. Tyto hodnoty jsou však pouze laboratorní při idealizovaných podmínkách. Ve skutečném provozu jsou tyto hodnoty o něco vyšší. Vývoj je tedy zaměřen na zvýšení životnosti, snížení nákladu a jednodušší systémové integraci. Výrobce většinou neposkytuje podrobné informace o použité technologii. V současnosti je hodně využívaným materiálem je sulfovaný fluoropolymer známý pod označením Nafion[®] od firmy DuPont. Tento materiál je teplotně velmi stabilní, odolává účinkům zásad i kyselin do teploty 125 °C a jeho životnost je 50 000 hodin. Také firma Dow chemical company vyrábí vlastní elektrolyt pod označením XUS 13204.10 a obsahuje polymerickou strukturu podobnou Nafionu. U tohoto materiálu bylo dosaženo snížení elektrického odporu a zvýšení proudové hustoty oproti Nafionu. Membrána je vložena mezi dvě elektrody. Mezi nimi se ještě nachází platinový katalyzátor. Na anodě se platina váže na vodík a následně uvolňuje kationty vodíku a volné elektrony. Tento proces je popsán následujícími rovnicemi:



Polymerová membrána je v sendvičovém uspořádání mezi dvěma deskami z porézního materiálu. Funkce těchto desek je následující:

- Rozvod reakčních plynů
- Mechanická podpora
- Vedení elektrického proudu (odvod volných elektronů vzniklých při reakci)
- Odvod produktové vody

Tyto desky, které se přímo dotýkají polymerového elektrolytu se vyrábějí z pórovitého materiálu, nejčastěji uhlíku. Ten může mít formu tkaniny nebo lisovaný z uhlíkových vláken. Obsahuje hydrofobní materiál jako je polytetrafluoroethylen. Účelem tohoto materiálu zabránit zanášení póru vodou, aby se zachovala čistá cesta pro průchod plynům. Také zabraňuje udržování vody na katodě. Jistý výrobce vymyslel alternativu jak odvádět produktovou vodu:

- Transport kapalně vody skrze bipolární desky do chladiwa
- Odpařování vody do reakčních plynů

Tyto články jsou podobné klasickým PEM článkům, ale mezi nimi rozdíl v konstrukci. Desky jsou také vyrobené z porézního uhlíku a během provozu jsou naplněny kapalnou vodou, která má přímý kontakt s chladivem (je třeba malý rozdíl tlaku mezi plynem a kapalinou). Voda

je s chladivem pak dopravována do zásobníku. Při tomto procesu je taky zajištěno zvlhčování plynů a zabraňuje se vysoušení membrány. [1]

1.2.3 Termodynamika palivových článků

Účelem tohoto oddílu je popsat chemické a termodynamické vztahy, kterými se řídí palivový článek a jaké provozní podmínky mají vliv na jeho výkon. Pochopení dopadů vlivů, jako je teplota, tlak a složení plynů, umožňuje vývojářům optimalizovat konstrukci palivových článků a tím maximalizovat výkon celkového systému.

Prvním krokem k pochopení, jak pracuje palivový článek, je definice ideálního výkonu. Pokud tedy známe ideální výkon a ztráty, které vznikají během skutečného provozu, může se zjednodušeně říct, že jejich odečtením dostaneme skutečný výkon.

Úloha Gibbsovy volné energie a Nernstova potenciálu

Maximální elektrická práce (W_{el}) získaná z palivového článku při konstantní teplotě a tlaku je dána změnou Gibbsovy volné energie (ΔG) elektrochemické reakce. Toto můžeme popsat následovně:

$$W_{el} = \Delta G = -nFE, \quad (23)$$

kde n je počet elektronů zúčastněných v reakci, F je Faradayova konstanta (96487 C/mol) a E je ideální napětí článku. K určení volné energie se může dojít za pomoci termodynamických zákonů, které je dále určeno.

Podle prvního termodynamického zákona, taky označovaného jako zákon zachování energie, můžeme napsat následující formulaci:

$$\Delta E = Q - W, \quad (24)$$

kde E představuje vnitřní energii, teplo je označeno Q a W představuje mechanickou energii. Změnu vnitřní energie tedy můžeme buď přidáváním nebo odebíráním tepla, nebo mechanické energie. Pokud je tedy:

$Q > 0$ – jedná se o příjem tepla

$W > 0$ – spotřebovávání práce

$Q < 0$ – teplo se odevzdává

$W < 0$ – koná se práce

Pak můžeme říct, že pokud nastane případ, kdy Q i $W > 0$, dojde ke zvýšení vnitřní energie. V opačném případě, kdy Q i $W < 0$, dojde ke snížení vnitřní energie. Dalšími zvláštními případy jsou pokud je hodnota tepelné energie $Q = 0$ a z toho vyplývá, že $\Delta E = W$ a jedná se o adiabatický děj. Podobně dojdeme i ke vztahu tepelné výměny, kdy $W = 0$ a $\Delta E = Q$. V palivových člancích je důležité vědět, za co je považována práce. Jedná se o transport uvolněných elektronů mezi dvěma rozdílnými potencióly. Pro palivový článek se první termodynamický zákon přepíše následovně:

$$\Delta H = Q - W, \quad (25)$$

kde H označuje entalpii, která představuje tepelnou energii uloženou v jednotkovém množství látky. Dále je možno rozepsat i vzorec pro elektrickou práci:

$$W = E I \Delta t, \quad (26)$$

kde E je napětí a I elektrický proud. Jak již bylo napsáno výše, za práci je označován transport elektronů. Volné elektrony tvoří elektrický proud, takže je možno vztah dále upravit:

$$I \Delta t = n F, \quad (27)$$

n označuje počet zúčastněných elektronů a F Faradayovu konstantu (96 485,339 9 C/mol). Pak práci přepíšeme do tohoto vztahu:

$$W = n E F, \quad (28)$$

Pomocí těchto úprav dostaneme modifikovaný první termodynamický zákon:

$$\Delta H = Q - n E F \quad (29)$$

Pro další rozbor termodynamických účinků palivových článků se použije druhý termodynamický zákon. Slovních formulací tohoto zákona je několik. Použit může být Carnotův popis, jenž říká, že pokud tepelný stroj pracuje mezi dvěma teplotami, nemůže mít nikdy větší účinnost než Carnotův tepelný stroj, pracující při stejných teplotách. Účinnost Carnotova cyklu bude dále ještě rozebrána. První termodynamický zákon říká, že energie nemůže samovolně vznikat, ale pouze se přeměňovat na jiný druh energie. V druhém zákoně se řeší, zda je tato přeměna vratná nebo nevratná. Nevratný děj si můžeme představit u točícího se ložiska, které se třením zahřívá a z mechanické energie vzniká tepelná. Avšak dodáním stejné tepelné energie se ložisko neroztočí. Toto je nevratný cyklus přeměny energie. Vratný cyklus v přírodě neexistuje a je používán jako zjednodušující aspekt při popisu přírodních dějů. V tomto případě se bude tedy uvažovat vratný děj s ideálním palivovým článkem. Tak teplo předávané během tohoto procesu je:

$$Q = T \Delta S \quad (30)$$

T je teplota a ΔS je termodynamická entropie. Tento vzorec do modifikovaného vzorce prvního termodynamického zákona:

$$\Delta H = T \Delta S - n E F \quad (31)$$

Z tohoto vztahu dostane již výše uvedený vzorec pro volnou energii:

$$\Delta G = -n E F \quad (32)$$

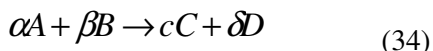
Můžeme ji také vyjádřit následovně:

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S, \quad (33)$$

kde ΔH je celková energie systému a $-T \Delta S$ představuje nedostupnou energii, kterou nelze použít k práci.

Množství tepla uvolněného palivovým článkem pracujícím vratně představuje $T \Delta S$. Reakce v palivových člancích, které mají negativní změnu entropie, generují teplo (např. vodíková oxidace), zatímco při kladné entropie (např. přímá pevná uhlíková oxidace) se teplo získává z okolí.

Obecný popis reakce v palivovém článku:



Standardní vzorec pro popis Gibbsovy volné energie je dán následovně:

$$\Delta G^0 = c \underline{G}_c^0 + \delta \underline{G}_d^0 - \alpha \underline{G}_a^0 - \beta \underline{G}_b^0, \quad (35)$$

kde \underline{G}_i^0 je parciální molární Gibbsova volná energie pro dané i při teplotě T . Tento potenciál může být vypočítán z tepelné kapacity C_p pro každé i , která je funkcí teploty T a z hodnot ΔS^0 a ΔH^0 při referenční teplotě, která je obvykle 298 K. Empiricky můžeme tuto kapacitu vyjádřit:

$$C_p = a + bT + cT^2 \quad (36)$$

kde a, b, c jsou empirické konstanty. Specifická entalpie pro všechny druhy i přítomné během reakce je dána tímto vztahem:

$$\underline{H}_i = \underline{H}_i^0 + \int_{298}^T C_{pi} dT \quad (37)$$

A při konstantním tlaku a teplotě T je specifická entropie:

$$S_i = \underline{S}_i^0 + \int_{298}^T \frac{C_{pi}}{T} dT \quad (38)$$

Koeficienty a, b, c stejně jako S^0 a H^0 jsou dostupné ve standardních tabulkách a mohou být použity pro tyto výpočty. Z těchto hodnot je možno dále vypočítat Gibbsovu energii ΔG a potenciál E při teplotě T . Místo těchto koeficientů se v moderní praxi využívají speciální tabulky, jako je JANAF Thermochemical tables, které poskytují informace o C_p , ΔH , ΔS , ΔG skrze všechny možné teploty a pro všechny požadované reakce.

Gibbsovu energii můžeme také vyjádřit takto:

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln \frac{f_C^c f_D^{\delta}}{f_A^{\alpha} f_B^{\beta}} \quad (39)$$

A podobně i Nernstův potenciál:

$$E = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{f_C^c f_D^{\delta}}{f_A^{\alpha} f_B^{\beta}} \quad (40)$$

Hodnota E^0 je pro palivové články, při teplotě 298 K, 1,187 V pokud produktová voda je kapalná a 1,229 V pokud je produktová voda plynná. [1,5,13,15]

1.2.4 Účinnost

Tepelná účinnost zařízení při přeměně paliva je definována jako množství vyrobené užitečné energie a změně entalpie ΔH .

$$\eta = \frac{\text{užitečná energie}}{\Delta H} \quad (41)$$

U tepelných motorů je chemická energie nejprve přeměněna na teplo, následně na mechanickou energii, která se dále přemění na elektrickou energii. Carnotův jev ukazuje, že maximální účinnost těchto motorů je omezena poměrem termodynamických teplot, při kterých motor pracuje. U palivových článků se chemická energie přímo na elektrickou. V ideálním případě představuje, v palivovém článku, Gibbsova volná energie elektrickou energii při teplotě přeměny T . Ideální účinnost palivového článku pracujícího vratně je pak:

$$\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H} \quad (42)$$

Pro názornost je zde uveden výpočet účinnosti palivového článku. Pokud budeme uvažovat standardní laboratorní podmínky (teplota 25°C a tlak 1 atm) a produktová voda bude v plynném stavu určí se entalpie reakce ΔH^0 následovně:

$$\Delta H^0_{(plyn)} = -230 \frac{BTU}{mol_{vody}} = -242 \frac{kJ}{mol_{vody}}, \quad (43)$$

kde $mol_{vody} = 6,023 \cdot 10^{23}$ molekul vody. Záporné znaménko znamená, že energie je v palivovém článku generována. Jednotka BTU (British thermal unit) je britská jednotka. 1 BTU = 1 055,05585 J. Jak již bylo popsáno, není možné využít veškerou energii. Projevují se ztráty způsobené nárůstem entropie. Užitečná energie je představována zmiňovanou Gibbsovou volnou energií, ze které je možno vypočítat napětí článku.

$$\mathcal{E}_{\text{článku}} = -\frac{\Delta G}{n \cdot F} \quad (44)$$

Do tohoto vzatu se dosadí jednotky pro přepočítání mezi jednotkami. Počet elektronů n zúčastněných při reakci se vyjádří jako mol elektronů ($mol\ e^- = 6,023 \cdot 10^{23}$ elektronů). Při reakci vzniknou z jedné molekuly vodíku dva elektrony. Pak pro každý 1 mol_{vody} vzniklý při reakci je $n=2\ mol\ e^-$. Faradayova konstanta má hodnotu 96 500 C/mol e^- . Dosazením těchto hodnot získáme následující vztah pro výpočet ideálního napětí článku bez polarizačních ztrát.

$$\mathcal{E}_{\text{článku}} = -\frac{-217\ BTU}{mol_{vody}} \cdot \frac{1055,7\ J}{BTU} \cdot \frac{mol_{vody}}{2 \cdot mol\ e^-} \cdot \frac{mol\ e^-}{96\ 500\ C} = \frac{1,187\ J}{C} = 1,187\ V, \quad (45)$$

při použití britských jednotek a

$$\mathcal{E}_{\text{článku}} = -\frac{-229\ kJ}{mol_{vody}} \cdot \frac{1000\ J}{kJ} \cdot \frac{mol_{vody}}{2 \cdot mol\ e^-} \cdot \frac{mol\ e^-}{96\ 500\ C} = \frac{1,187\ J}{C} = 1,187\ V, \quad (46)$$

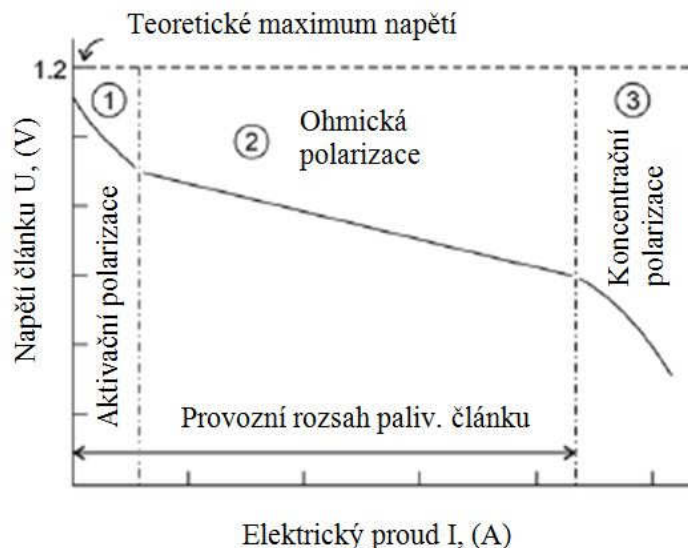
při použití metrických jednotek. Účinnost palivového článku pak tedy vypočteme následovně:

$$\eta_{\text{článku}} = \frac{V_{skut}}{\mathcal{E}_{\text{článku}}} \cong \frac{V_{skut}}{1,187} \quad (47)$$

Napětí naprázdno je přibližně 1,1 V. Účinnost pak vychází 92%. Zatížená palivový článek pracuje při napětí 0,5-0,6 V. V tomto stavu dosahuje účinnost 40-50%. [16]

1.2.5 Charakteristiky PEM článků

Polarizační charakteristika je vlastně Volt-Ampérová charakteristika, která zobrazuje jak se při zvýšení odebíraného proudu sniží provozní napětí.



Obr. 15 Polarizační charakteristika palivového článku

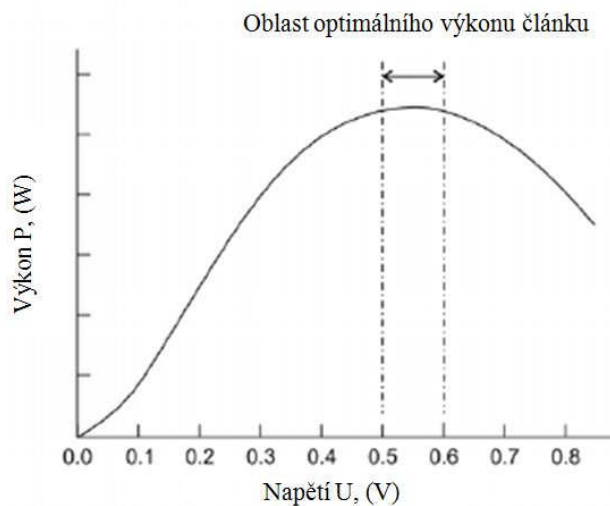
Typická závislost napětí a proudu v palivovém článku je na obrázku (Obr. 15). V praxi se více využívá charakteristika, kde místo proudu je proudová hustota v A/cm^2 . Tato hodnota nám lépe vystihuje jak je účinně je využita membrána a taky jakého výkonu dosahuje. Z charakteristiky je patrné, že největší napětí je při provozu naprázdno. Toto napětí dosahuje teoretické hodnoty 1,187 V (1,229 V). Standardní provozní napětí palivového článku je 0,5-0,7 V. Celkovou polarizaci ovlivňují tři základní oblasti:

- Aktivační polarizace
- Ohmická polarizace
- Koncentrační polarizace

Aby mohla být reakce uvnitř palivového článku spuštěna, je potřeba dosáhnout nějaké hladiny energie. Tato energie je spojena s aktivační polarizací. Vzhledem k tomu, že se elektrolyt a elektrody řídí ohmovým zákonem ($U=R \cdot I$), je ohmická polarizace lineární. Tato polarizace se vyskytuje díky Joulových ztrát, způsobených komponenty palivového článku. Koncentrační polarizace nastává, když jsou reaktanty spotřebovávány rychleji, než mohou být dodávány. Tím dochází k hromadění produktové vody uvnitř článku, zpomalování reakce a poklesu napětí až na nulu.

Výkon palivového článku se vypočte podle klasického vzorce ($P = U \cdot I$). Jelikož podle polarizační charakteristiky existuje vždy vztah mezi napětím a proudem, je tedy možnost vytvořit z těchto hodnot výkonovou charakteristiku. Na sestrojené křivce je možno pozorovat oblast optimálního výkonu, která se pohybuje v rozmezí 0,5-0,6 V. Této hodnotě napětí

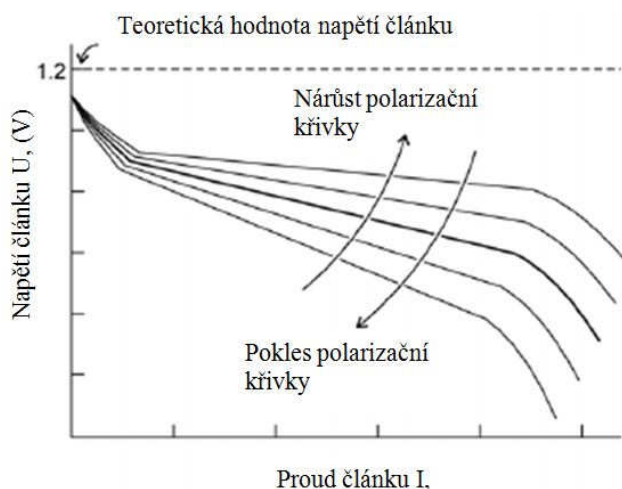
odpovídá poměrně vysoká hodnota elektrického proudu. V této oblasti maximálního výkonu dochází k rovnosti elektrického odporu palivového článku a vnějšího obvodu. Provoz mimo oblast optimálního výkonu je nevhodná



Obr. 16 Výkonová charakteristika palivového článku

Vliv na provoz palivových článků má i teplota a tlak. Tyto parametry ovlivňují samostatnou polarizační křivku. Změnou těchto hodnot dochází buď k nárůstu nebo poklesu této křivky. Vždy je žádoucí aby docházelo k nárůstu křivky, protože to vede ke zvýšení výkonu. Toho zvýšení dosáhneme zvyšováním tlaku. Tím se ale taky zvýší požadavky na těsnění, aby nedocházelo k úniku plynu. Stejný efekt jako má tlak má i pracovní teplota. Zvýšením teploty dosáhneme nárůstu polarizační charakteristiky. PEM články jsou limitovány teplotou 100°C. Protože při této teplotě dochází k přeměně produktové vody v páru. Ta v proudu okysličovadla snižuje tlak kyslíku. To vede k velkému snížení výkonu. Optimální teplota provozu PEM článků je 80°C.

[16]



Obr. 17 Vliv teploty a tlaku na polarizační charakteristiku

2 Rozbor stávajících možností akumulace elektrické energie na bázi palivových článků

Tato kapitola se zabývá systémy, které elektrickou energii vyrobenou pomocí solárních panelů akumulují do vodíků. Všechny zde uvedené systémy pracují na stejném principu. Liší se však použitými komponenty, parametry a aplikací v praxi. Vždy je použit elektrolyzátor, který pracuje v době, kdy nastal nadbytek energie. Elektrolyzátor vyrábí vodík, který představuje akumulovanou energii. Vodík se plní do zásobníku a slouží jako dlouhodobé skladiště, které se využije v době kdy je nedostatek elektrické energie. Pro tento účel jsou použity vodíkové palivové články.

2.1 SAPHYS

Projekt SAPHYS (Stand-Alone Small Size Photovoltaic Hydrogen Energy System) byl připojen k projektu ENEA (Ente per le Nuove Tecnologie, l'Energia e l'Ambiente; Itálie), IFE (Institut für Energietechnik; Norsko) a KFA (Forschungszentrum Jülich, Německo) a byl podporován Evropskou komisí v rámci programu pro nejadernou energii JOULE-II. Účelem tohoto programu bylo řešení otázek týkajících se globálních ekologických problémů, způsobené použitím fosilních paliv, vedoucích ke změnám klimatu. Tento program tedy vedl ke konstrukci zařízení pro výrobu elektrické energie, při které by se nevyužívalo těchto fosilních paliv. Systém se zakládal na použití solárně/vodíkového způsobu výroby energie. Solární panely sloužily pro výrobu vodíku, který se skladoval a následně použil jako palivo pro palivové články. Cílem celého projektu bylo vytvořit samostatně, dlouhodobě a bezpečně pracující systém pro výrobu elektrické energie.

Systém SAPHYS s výkonem několika kilowatt je navržen pro odlehlé, izolované ostrovní aplikace, jako je například telekomunikační stanice, odlehlá obydlí, vzdálené monitorovací a řídicí stanice. Základem je fotovoltaické pole, dodávající energii do zátěže, do elektrolyzátoru a do baterií. Baterie jsou neustále připojeny k hlavní sběrnici a pomáhají vyrovnávat krátkodobé nedostatky nebo přebytky energie jdoucí z ze solární elektrárny. Celý systém je navržen, aby pracoval v plně automatickém režimu s vhodným řídicím počítačem a softwarem. Výstavba trvala 36 měsíců a provoz byl zahájen v roce 1997. Před výstavbou se tento systém simuloval počítačově programem JULSIM vyvinutá společností KFA pro jejich vlastní solárně/vodíkový systém. Na základě těchto simulací se přikročilo k samotné výstavbě.

Většina komponent byla sestavena ve výzkumném středisku ENEA v Casaccia s použitím zkušebního solárně/vodíkového zařízení PHYTR u kterého se provedly dvě zásadní vylepšení. První bylo použití výkonnějšího a účinnějšího elektrolyzátoru a druhé, implementace systému, řídicího celé zařízení.

Jak již bylo výše zmíněno. Celý systém se zakládal na zařízení PHYTR. Tvoří ho fotovoltaické pole, složené ze 180 panelů od různých výrobců (Arcosolar, Helios a Italsolar), které jsou poskládány do osmi subpolí. Aby byly panely účinnější i v zimním období, byl jejich

sklon nastaven na 50° od vodorovné plochy. Všechna subpole byla poskládána tak, aby jejich napětí při provozu bylo minimálně 36 V, napětí naprázdno 60 V a výkon 5,6 kW (za předpokladu 1000W/m² a 25°C). Všechna pole byla pak připojena na společnou sběrnici. Na tuto sběrnici jsou také připojeny všechny ostatní komponenty, včetně baterii s kapacitou 51 kW, uzpůsobené na napětí 34 V DC (1500 Ah). Zásobník vodíku má kapacitu 300 Nm³. Tlak vodíku je 20 barů (přibližně 20 atm).

Elektronická zátěž je použita tak, aby simulovala poptávku energie u dvou rodinných domů se standardním elektrickým zařízením. Během zimního období byly testy poněkud limitovány, takže v úvahu byly brány pouze výsledky z období mimo zimu. Při letní zátěži byl simulován jeden odběr výkonu za hodinu o velikosti 0,4 kW a dva špičkové odběry ráno (4 kW) a večer (2,5 kW). Celková denní spotřeba byla stanovena na 11 kWh. Pomocné zařízení (kompresor, topení, chlazení, úprava vodíku, vodní hospodářství ...), monitorovací a kontrolní zařízení byly napájeny přímo z distribuční sítě.

Sekce s elektrolyzérem je založena na jednotce Metkon-Alyzer Model 0100, který je konstruován pro použití v součinnosti s fotovoltaikou a pracuje až do tlaku 20 barů. Díky optimalizaci pro solární pohon, má elektrolyzér vysokou účinnost a výborné dynamické vlastnosti při nestálé dodávce energie, která se objevuje u slunečních panelů. Vyráběný vodík má vysokou čistotu. Na základě simulací, prováděných před výstavbou, byl původní elektrolyzér o výkonu 2,5 kW nahrazen výkonnější jednotkou s výkonem 5 kW. Je řízen vlastním řídicím členem, který spolupracuje s řídicí jednotkou celého systému SAPHYS. Pomocí simulačního programu SIMWELLY byly stanoveny pracovní charakteristiky v rozmezí teplot 25°-80°C. Samotný elektrolyzér se skládá ze 17 článků spojených bipolárně s jedinou elektrodou. Celková účinnost byla 87% (HHV) stanovena při teplotě 80°C a výkonu 5 kW.

Tabulka 3 – Parametry elektrolyzéru systému SAPHYS

Špičkový výkon	5 kW
Aktivní oblast	600 cm ²
Počet článků	17
Koncentrace elektrolytu	30% KOH
Pracovní teplota	80°C
Maximální pracovní tlak	20 bar
Proud	180 A
Napětí na článku	1,67 V DC
Napětí modulu	28,4 V DC
Tepelné ztráty	580 W

Palivový článek použitý v tomto systému je od firmy Ballard Power System. Jedná se o palivový článek s tuhým polymerovým elektrolytem. Jeho výkon je 3 kW. Palivem je čistý vodík, vyrobený v elektrolyzéru a oxidant je kyslík získaný z atmosférického vzduchu. Dokáže

pracovat při poměrně nízkých teplotách (okolo 72°C). Tlak vodíku je 3,1 barů a vzduchu 4,4 barů. Vyznačuje se rychlým startem, jednoduchou instalací, vysokou účinností a rychlou reakcí na změny zatížení. Stejně jako elektrolyzátor, je i tento palivový článek opatřen vlastním řídicím členem, spolupracujícím s hlavní řídicí jednotkou.

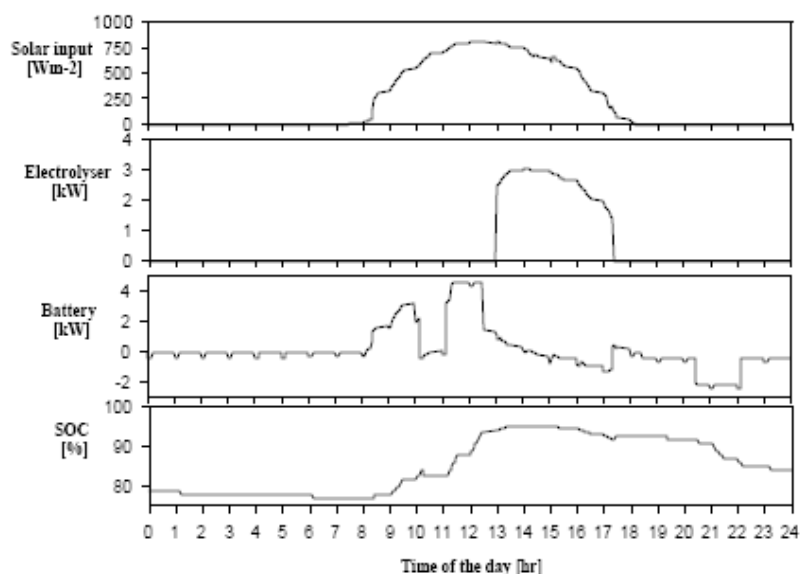
Tabulka 4 – Parametry palivového článku systému SAPHYS

Typ palivového článku	PGS 103 A
Počet článků ve stacku	35
Elektrolyt	Nafion 117
Aktivní plocha elektrod	232 cm ²
Hmotnost stacku	48 kg
Hmotnost celého modulu	150 kg
Palivo	Vodík
Oxidant	Atmosférický vzduch
Napětí a proud	>21 V DC při 125 A
Výkon	3000 W
Příkon podpůrných systému	<250 W

Řídicí systém SAPHYS se skládá ze tří částí.

- Řídicí systém pro elektrolyzátor, palivový článek a vodíkový okruh.
- Výstražný systém dohlížející na správný provoz
- Hlavní řídicí jednotka – provádí energetický management (EM)

Řídicí systém kontroluje provoz a jeho výstupem jsou signály pro nastavení provozu všech komponent. Obsahuje algoritmus, který na základě zjištěným provozních stavů, rozhoduje o dalším dění.



Obr. 18 Denní charakteristiky komponent systému SAPHYS

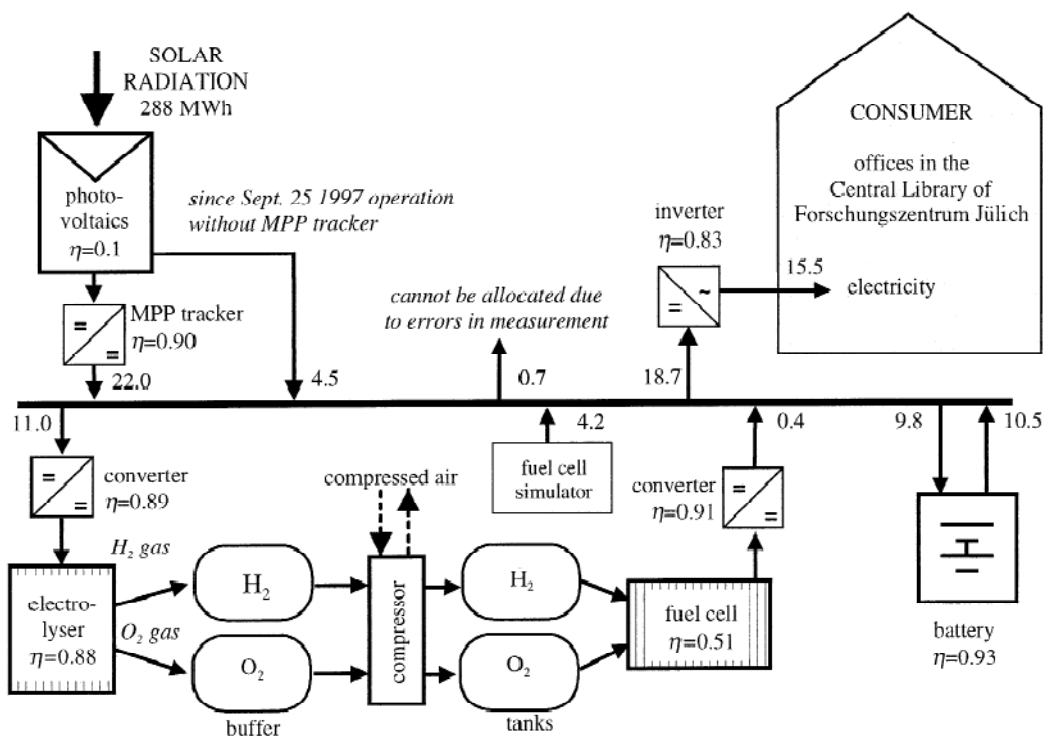
Jako příklad je na obrázku (Obr. 18) uveden záznam činnosti jednotlivých součástí systém během jednoho slunečného dne (22.10.1997). Pro přehled nejprve uvedu význam jednotlivých charakteristik. První od shora představuje výkon solárních panelů. Druhá charakteristika představuje činnost elektrolyzáru. Pod ní je charakteristika ukazující výkon baterii a poslední uvádí stav nabití baterií. Od půlnoci do osmé hodiny ranní poklesl stav nabití baterií na hranici 77%, takže když v osm hodin začaly fotovoltaické panely dodávat energii, je tato energie použita k nabití akumulátorů. Při nabití na 94% kolem poledne, je spuštěn elektrolyzáru, který začne vyrábět vodík. Přibližně v 17:30 je elektrolyzáru vypnut z důvodu nedostatku energie jdoucí ze solárních panelů. Během činnosti elektrolyzáru jsou zároveň dobíjeny baterie. V ranních hodinách je zátěž napájena především z fotovoltaických panelů, zatímco ve večerních hodinách je energie dodávána pouze z akumulátorů. Teplota elektrolyzáru nedosáhla své pracovní teploty (80°C), ale pohybovala se kolem 50°C. I přes tuto nízkou teplotu pracoval samotný elektrolyzáru s účinností 77,4%. Celková účinnost výroby vodíku pak byla 54,7%. [10]

2.2 PHOEBUS

Systém představuje samostatný zdroj elektrické energie získané z obnovitelných zdrojů. Podobně jako u systému SAPHYS je i u toho systému řešena výroba energie ve fotovoltaických panelech a možnost jejího skladování ve vodíku. Všechny tyto systémy řešily problém se synchronizací jednotlivých komponent, aby jednotka mohla pracovat samostatně. Německé země jako je severní Porýní-Vestfálsko společně se společností Forschungszentrum Jülich (FZJ) se rozhodli zhodnotit možnosti poskytování takto vyráběné energie. Systém měl zahrnovat

fotovoltaické panely, vodíkový zásobník a baterie. Za tímto účelem byl vymyšlen projekt PHOEBUS. Od roku 1993 byl zahájen nepřetržitý, demonstrační provoz tohoto systému v místě společnosti FZJ. Podobné projekty se prováděly i jinde ve světě, například v Saudské Arábii, USA, Itálii, Německu, Finsku. PHOEBUS je však světovým unikátem díky své velikosti a dlouhodobému provozu.

Hlavním úkolem PHOEBUS je možnost dlouhodobého skladování vodíku a rozvoj automatického hospodaření s energií a zajištění maximální bezpečnosti, spolehlivosti a efektivnosti.



Obr. 19 Schéma systému PHOEBUS

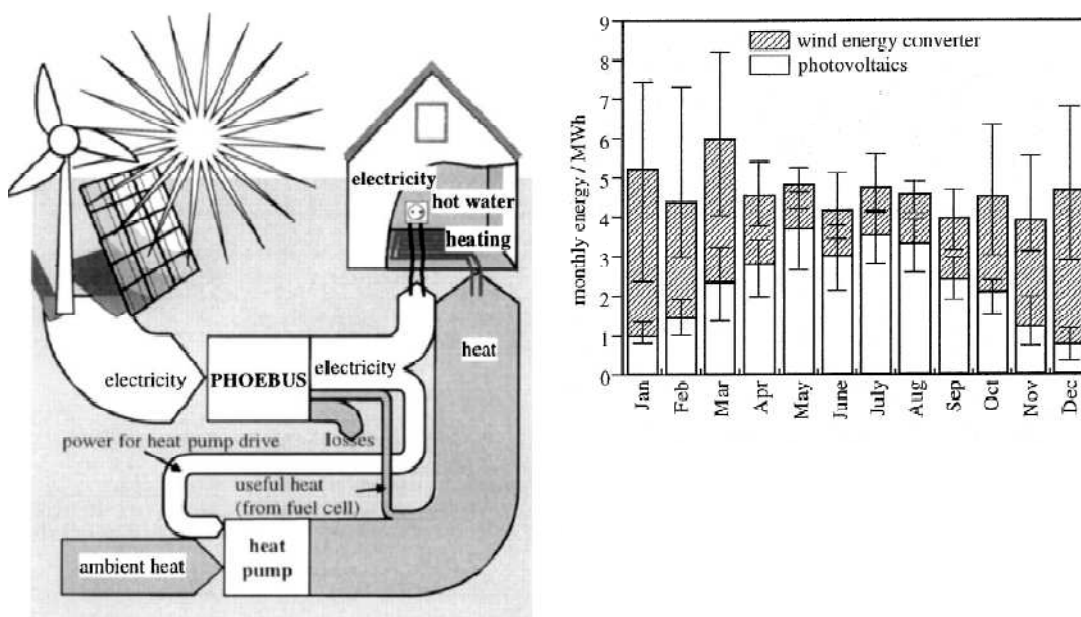
Na obrázku (Obr. 19) je schéma celého systému. Tlustou čarou je vyznačená hlavní sběrnice, na kterou jsou připojeny všechny komponenty. Hlavní část tvoří fotovoltaická elektrárna s výkonem 43 kWp (kWp je jednotka špičkového výkonu fotovoltaické elektrárny při standardních podmínkách, které jsou: energie dopadá na fotovoltaický panel kolmo a má hodnotu $E = 1000 \text{ W/m}^2$, průzračnost atmosféry $AM = 1,5$, teplota článků $T = 25^\circ\text{C}$), která je nainstalována na fasádě a střeše společnosti FZJ. Další částí je 110 kyselých olověných akumulátory s kapacitou 1380 Ah, které slouží přes den se nabíjejí a také slouží jako špičkový zdroj při náhlých změnách zatížení. Systém hlídá stav nabití těchto baterií a nenechá tento stav poklesnout pod stanovenou hranici. Pokud jsou dostatečně nabité a fotovoltaický zdroj stále vyrábí dostatečné množství energie, je připojen elektrolyzátor, který začne vyrábět a skladovat vodík.

Během šestiletého nepřetržitého ostrovního režimu, kdy systém pracoval při reálných podmínkách ozáření, byly prokázány jeho funkčnost, spolehlivost a také vysoká účinnost, která je taky vidět na předešlém schématu. Velice dobře se osvědčil použitý elektrolyzátor od švýcarské společnosti Alyzer. Během provozu se však ukázalo několik nedostatků, které vedly k dalším vylepšením.

Palivový článek byl původně použitý alkalický od firmy Siemens s výkonem 6,5 kW. Ten však nebyl schopen pracovat samostatně po dlouhou dobu, kdy během jednoho roku docházelo ke stovkám zapnutí. Proto byl během zimního období mezi roky 1999-2000 nahrazen novým polymerovým (PEM) palivovým článkem s výkonem 5,6 kW také od firmy Siemens. Také bylo uznáno za zbytečné plýtvání produktovou vodou z palivového článku. Pro elektrolyzátor i pro ostatní potřeby byl používána voda z externího zdroje. Aby se ušetřilo místo pro skladování H_2 a O_2 byly tyto plyny skladovány pod tlakem 120 barů.

Aby bylo možné zhodnotit dosavadní výsledky a vylepšit celý systém PHOEBUS, byly během provozu prováděny simulace na průběžně se vyvíjejícím softwaru, který využíval skutečné hodnoty a společně s poznatky s dlouhodobým provozem, byly řešeny otázky ke zlepšení tohoto systému, aby byl jeho provoz efektivnější z energetického i finančního. Během následných vylepšení byly použity nové polovodičové spínače, které mohou pracovat při velké proudové zatížitelnosti (150 A) a zároveň mají malý odpor (2,9 m Ω). To vedlo k úpravě možnosti spínání jednotlivých komponent a zvýšení účinnosti. Dalším způsobem jak zjednodušit systém bylo použití vysokotlakého elektrolyzátoru, který nahradí mechanický kompresor. U tohoto elektrolyzátoru je potřeba, aby vstupní voda byla pod požadovaným tlakem. U mechanického kompresoru musely být oba vyráběné plyny odděleně tlakovány na požadovanou hodnotu a následně pod tímto tlakem přečerpány do zásobníku. Díky tomuto vysokotlakému alkalickému elektrolyzátoru (120 bar) s výkonem 5 kW, bylo dosaženo 80% účinnosti výroby vodíku. S tímto vylepšením neslo program označení PHOEBUS-2

PHOEBUS-3 přinesl další vylepšení. Byl doplněn o tepelné čerpadlo a malou větrnou elektrárnu. Tak bylo dosaženo, že systém byl schopen dodávat jak elektrickou, tak i teplo a teplou vodu kompletně z obnovitelných zdrojů. Na obrázku (Obr. 20) je vidět zjednodušené schéma tohoto vylepšeného zařízení. Vyráběná elektřina slouží pro napájení standardní zátěže a také pro napájení tepelného čerpadla, produkujícího teplo. Na energetické bilanci je patrné užitečného využití tepla z palivových článků. Vedle je záznam vyprodukované energie z fotovoltaické a větrné elektrárny.



Obr. 20 Rozšíření systému PHOEBUS

Parametry systému PHOEBUS:

Fotovoltaické panely s výkonem 43 kW a plochou 312 m².

Tabulka 5 – Parametry alkalického elektrolyzáru systému PHOEBUS

Počet článků	21
Plocha elektrod	0,25 m ²
Maximální proudové zatížení	3000 A/m ²
Maximální napětí stacku	37 V
Maximální tlak	7 bar
Provozní teplota	80°C
Maximální výkon	26 kW
Minimální výkon	5 kW
Elektrolyt	40% KOH

Tabulka 6 – Parametry palivového článku systému PHOEBUS

Jmenovitý výkon	5,6 kW
Napětí naprázdno	35 V
Maximální proud	200 A
Provozní tlak	2,0-2,3 bar
Doba startu	Okamžitě

Provozní teplota	80°C
Počet článků	33
Aktivní plocha elektrod	1,167 cm ²

[7,11]

2.3 Schatz

Program SCHATZ začal v roce 1989 a jeho cílem bylo demonstrovat spolehlivé zařízení pro výrobu energie na základě solární/vodíkového systému. Byl financován prostřednictvím dotací Dr. L.W. Schatze. Celý projekt spadá pod společnost SERC (Schatz Energy Research Center). Celý systém je plně automatizovaný a instalovaný v Humboldt State University's Telonicher Marine Laboratory v Kalifornii, kde slouží jako zdroj pro vzduchový kompresor provzdušňující akvária. Stejně jak v jiných podobných zařízeních slouží sluneční panely pro napájení kompresoru i napájení elektrolyzéru vyrábějícího vodík. Pokud není energie ze slunce dostupná, přichází na řadu palivový článek, který začne vyrábět energii z uskladněného vodíku. Výzkumná akvária na univerzitě jsou tedy nepřetržitě provzdušňována.

Systém tvoří 192 modulů M75 od firmy Siemens. Dalším komponentem je elektrolyzátor s výkonem 6 kW, který je schopen produkovat 20 litrů vodíku za minutu při tlaku přibližně 7 barů. Vodík se skladuje pod stejným tlakem ve třech zásobnících, každém o objemu 2000 litrů. Palivový článek je PEM s výkonem 1,5 kW. Celý systém pak řídí řídicí počítač, kontrolující stav jednotlivých komponent a rozhodující a dalších dějích.

V roce 1991 byl systém zprovozněn. Po deseti letech provozu v letech 2001-2002 proběhla kompletní rekonstrukce počítačového řídicího systému a u fotovoltaických panelů se zjišťoval stupeň degradace. Výsledky tohoto testování byly prezentovány na dvacáté deváté konferenci IEEE PV Specialists conference v roce 2002, a jsou také zobrazeny v následující tabulce (Tabulka 7).

Tabulka 7 – Porovnání parametrů po 11 letech (SCHATZ)

Parameter	1990		2001		% Change
	\bar{x}	s_x	\bar{x}	s_x	
P_{max} (W)	39.88	0.849	38.13	1.67	-4.39
V_{oc} (V)	18.19	0.131	18.15	0.108	-0.22
I_{sc} (A)	3.29	0.044	3.08	0.120	-6.38
R_s (Ohms)	0.347	0.115	0.384	0.184	10.66
R_p (Ohms)	171	39.2	115	48.7	-32.75
ekt (V ⁻¹)	0.709	0.125	0.896	0.26	26.38
V_{mp} (V)	13.9	0.20	14.2	0.33	2.16
I_{mp} (A)	2.88	0.033	2.69	0.111	-6.60

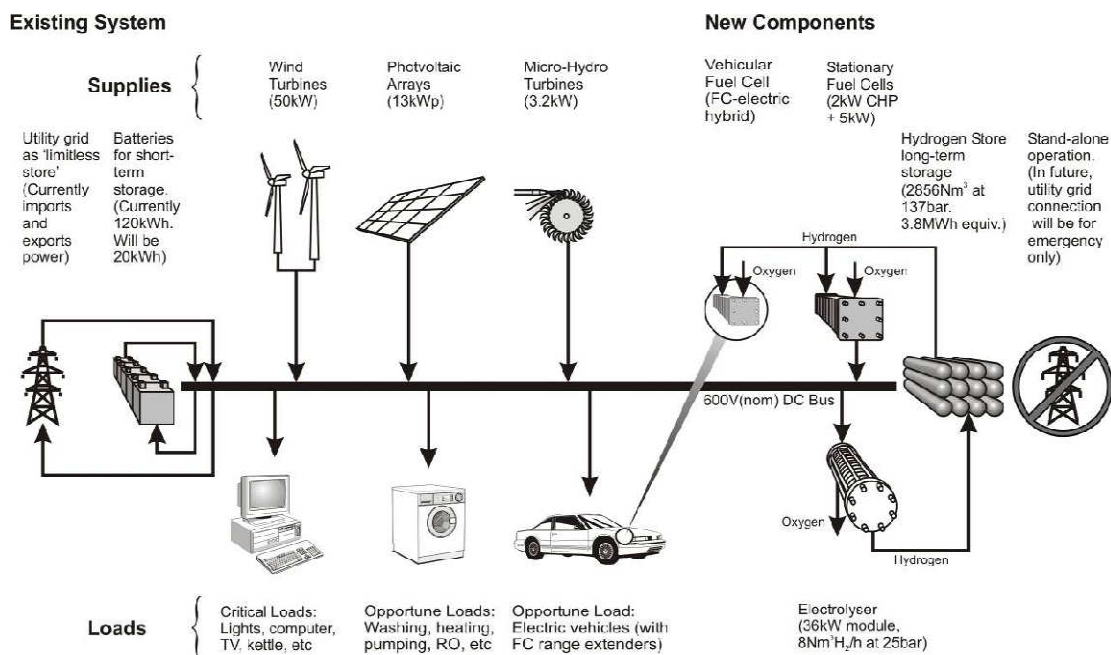
Hodnoty \bar{x} představují měřenou veličinu a s_x standardní odchylku. V posledním sloupci je v procentech vyznačen pokles jednotlivých veličin. U solárních panelů došlo důsledkem degradace k poklesu výkonu ze 7,5 kWp na 6,3 kWp (pokles o 16%) za patnáct let provozu.

Po těchto testech byl vyměněn palivový článek za nový, také došlo k přepojení fotovoltaických panelů, aby se zvýšilo napětí z 28 V na 48 V při maximálním výkonu. Tohoto řešení bylo zvoleno, aby se ušetřily náklady a nemuselo se pořizovat nové solární panely. Také byl instalován nový DC/DC měnič, který umožní panelům pracovat na plný výkon, ale výstupní napětí je snižené a tudíž byl získána velká proudová rezerva pro odběr. Tato renovace zajistila, aby systém mohl nadále pracovat automaticky po řadu dalších let. [8,12]

2.4 HARI

V principu se tento projekt neliší od předešlých projektů, elektrická energie se vyrábí z obnovitelných zdrojů a slouží pro napájení jak zátěže, tak i elektrolyzátoru, který vyrábí vodík, pokud je přebytek energie. Energie vodíku je následně použita pro výrobu energie v palivových článcích. Liší se však v obsažených komponentech. Zde se primární energie nevyrábí pouze ve fotovoltaických panelech, ale i pomocí malé větrné a vodní elektrárny. Tento projekt pojmenovaný HARI (Hydrogen and Renewables Integration) sloužil jako demonstrační a výzkumný program, pro získávání zkušeností v oblasti akumulace energie do vodíku.

Celé zařízení se nachází na West Beacon Farm v Leicestershire v Anglii. Ještě před začátkem projektu HARI existovaly v této oblasti dvě větrné elektrárny Carter s výkonem 25 kW, solární elektrárna o výkonu 13 kWp a dvě vodní mikro-turbíny s kombinovaným výkonem 3 kW. Dalším zařízením bylo 10kW tepelné čerpadlo, pracující s cirkulovanou vodou na dne místního jezera, sloužící k vytápění domu. Dále zde bylo zařízení pracující na LPG s výkonem 15 kW elektrických a 38 kW tepelných. Na střeše jsou umístěny vakuové solární panely pro ohřev vody. Pro pasivní vytápění je v domě zimní zahrada. K domu patří také dva automobily. Jeden je pouze elektrický napájený bateriemi a druhý hybridní s bateriemi a spalovacím motorem. Užitková voda pro dům a voda pro elektrolyzátor je používána dešťová voda, sbíraná ze střechy. Původně zde byly instalované olověné baterie s kapacitou 120 kWh, které byly redukovány na 20 kWh. Celé zařízení bylo připojené na veřejnou síť. Nově se k tomuto existujícímu systému přidalo zařízení na výrobu vodíku.



Obr. 21 Schéma systému HARI

Použitý elektrolyzátor je alkalický, vyrobený evropskou firmou Stuart (dříve Vandenberg Hydrogen Systems VHS) pracující při tlaku 25 barů a účinnosti až 3,9 kWh/Nm³. Tento elektrolyzátor byl vybrán na základě informací poskytnutých výrobcem, který upozornil na fakt, že elektrolyzátor je omezen na počet zapínacích a vypínacích cyklů a to v počtu 2500 cyklů. Po překročení této hranice by mělo začít docházet ke znatelnému poklesu výkonu. Aby byl tento problém zmírněn, byly do systému přičleněny baterie, které počet spínacích cyklů snížily.

V projektu se uvažovalo využít skladování vodíku v hydridech kovů, ale v době instalace nebyly na trhu komerčně dostupné, takže se použilo klasické skladování plynného vodíku pod tlakem. Úložiště vodíku představovalo 48 nádob z měkké oceli s vnitřním objemem 0,475 m³ a vnějšími rozměry 3,7 m na délku a 0,475 m v průměru s tloušťkou stěny 38 mm. Každý váží kolem jedné tuny. Jejich celková kapacita je 2856 Nm³ vodíku. Tlak vodíku v láhvích je 137 barů. Při plném naplnění celého zásobníku vyprodukuje vodík v palivových článcích 3,8 MWh elektrické energie, což stačí na přibližně tři týdny provozu pouze na tento akumulovaný vodík. Tento vodíkový systém slouží jako dlouhou úložiště energie. Pro krátkodobé ukládání se použila baterie Zebra (NaNiCl), pracující při vysoké teplotě (250°C) a s kapacitou 20 kWh. Pro plnění vodíku do zásobníku se použil kompresor Hydro-Pac C03-05-2550LX-V s kompresním poměrem 1:8. Mezi elektrolyzátor a kompresor byla přidána vyrovnávací nádrž s objemem 37,85 l.

První palivový článek, který se na farmě instalovat byl od výrobce Intelligent Energy. Jednalo se o PEM článek s výkonem 2 kW. Po půl roce se připojil druhý článek Gencore® s výkonem 5 kW od výrobce SiGen. Do budoucna se uvažuje o přidání dalšího palivového článku. Menší 2kW článek je schopen na krátkou dobu (15 minut) dodávat výkon 4 kW.

V tabulce (Tabulka 8) jsou shrnuty všechny použité komponenty, včetně výrobců a jejich parametrů.

Tabulka 8 – Parametry systému HARI

Komponent	Výrobce/dodavatel/ Typ výrobku	Parametry
Elektrolyzér	Hydrogenics (dříve Vandenborre)	8 Nm ³ /h H ₂ , 34 kW, 2.5 MPa (25 bar)
Palivový článěk (1)	Intelligent Energy, CHP Unit	2 kW (el), 2 kW (th), 24 VDC
Palivový článěk (2)	Plug Power GenCore, dodavatel SiGen Ltd	5 kW (el), 48 VDC
H ₂ kompresor	Hydro-Pac, dodavatel BOC	11 Nm ³ /hour, 3.75 kW, kompresní poměr 8:1
H ₂ zásobník	Supplied by BOC	48 láhví, 0.475 m ³ , 13.7MPa (137 bar) max. tlak, 2856 Nm ³ H ₂ celková kapacita
Větrná elektrárna	Carter Wind Turbines	2 x 25 kW dvou listová
Solární panely	BP	13 kW celková, polykrystalické i monokrystalické
Vodní elektrárna	Dulas	850 W a 2.2 kW Turgo

[9]

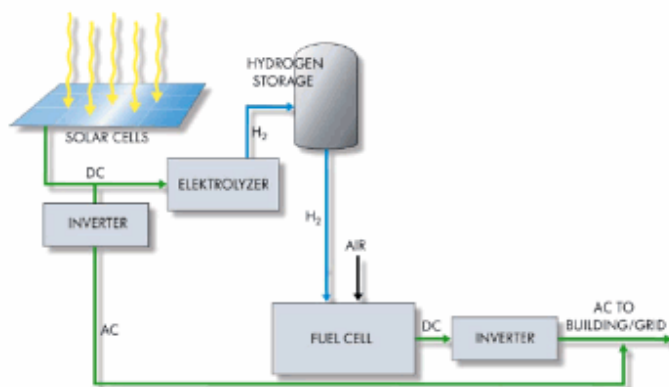
3 Návrh systému pro bivalentní provoz palivových a fotovoltaických článků za účelem výroby a akumulace elektrické energie. Možnosti optimalizace chodu palivového článku při výrobě elektrické energie

Tato kapitola se zabývá řešením dodávky a akumulace elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Podpírá se o zkušenosti již hotových systému, pracujících na stejném nebo podobném principu. Bivalentní provoz palivových a fotovoltaických článků je možný provozovat ve dvou základních režimech:

- Ostrovní režim (stand alone, grid-off)
- Připojení k rozvodné síti (grid-on, grid connected)

První zmiňovaný ostrovní režim se uplatňuje především na místech kde je velká vzdálenost mezi rozvodnou soustavou a napájeným místem. Jedná se stacionární aplikace, například o chaty, chalupy, monitorovací stanice, telekomunikační stanice, ale i mobilní aplikace jako jsou karavany, jachty a podobně. Liší se především svou jak rozměrovou, tak i výkonovou velikostí.

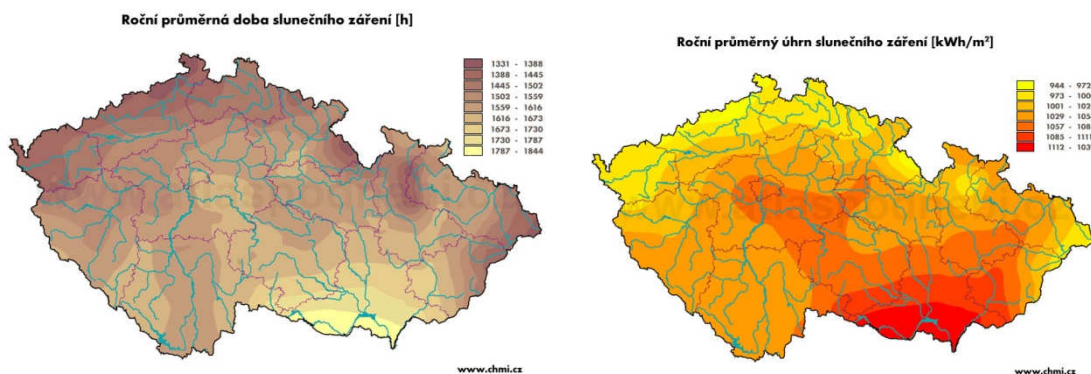
Druhý režim je připojení přímo do sítě rozvodné soustavy. Toto řešení se používá například v oblastech kde je nedostatek elektrické energie. Současné instalace tohoto typu jsou především z ekologických důvodů, jelikož samotná výroba nespotřebovává žádná paliva, ani nevypouští žádné nebezpečné látky do ovzduší. Samotný provoz je naprosto čistý. Systém, který je připojen do sítě je možno realizovat dvěma způsoby. Buď se může celá vyrobená energie předávat do rozvodné soustavy a tak prodávat energii, nebo se může tato energie spotřebovat přímo na místě, podobně jako u ostrovního režimu. Pokud je zvolena druhá možnost, ušetří provozovatel na nákupu energie od dodavatele a navíc inkasuje Zelený bonus. Tento systém je tedy v současné době nejvýhodnější. [21,30]



Obr. 22 Schéma bivalentního systému

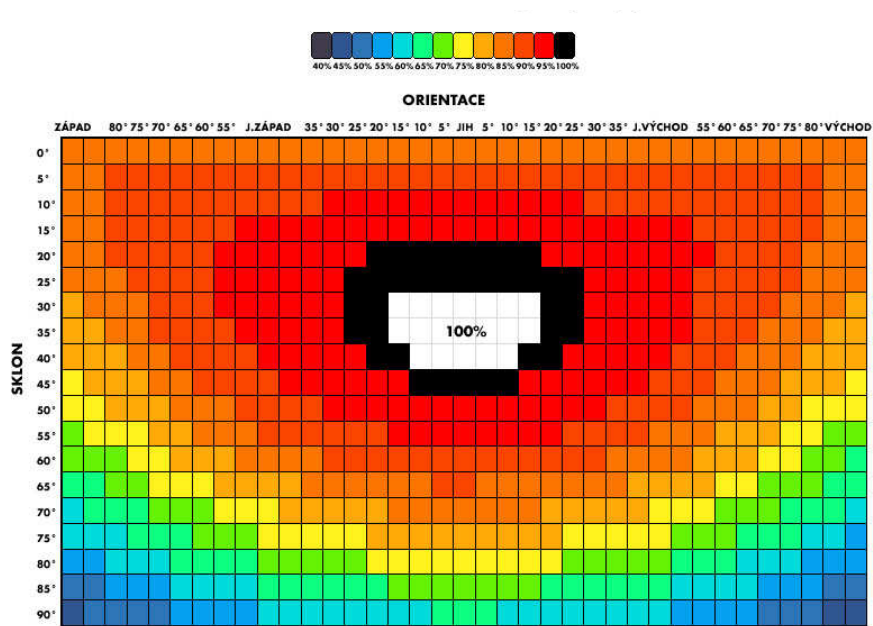
3.1 Solární panely

V současné době se mnoho firem v ČR zabývá instalací fotovoltaických elektráren pro různé druhy využití (rodinné domy, průmysl, velké fotovoltaické elektrárny). Při návrhu takového zdroje energie je důležité znát několik parametrů, ze kterých se vychází při jejich návrhu. Výkon je ovlivněn především geografickou polohou. Rozloha České republiky je 78 867 km². Z toho je 67% rozlohy pod 500 m n. m.. Z těchto údajů se vychází, protože s rostoucí nadmořskou hladinou roste i intenzita osvitů. V nadmořské výšce 700-200 metrů je intenzita záření o 5% větší než v nižších výškách. Ohled by se měl brát také na množství přímého a difúzního záření. V našich podmínkách je podíl difúzního záření přibližně 40% a 60% tvoří záření přímé. Dalším parametrem je průměrné množství energie dopadající na jednotku plochy. Toto množství energie se pohybuje v rozmezí 950-110 kWh. Pro návrh je důležité také znát roční využití slunečního záření. Různé zdroje uvádějí různé hodnoty, ale doba využití se pohybuje přibližně v rozmezí 1300-1800 hodin za rok. Všechny tyto parametry jsou zaneseny v mapách (Obr. 23), které poskytuje Český hydrometeorologický ústav. V těchto mapách jsou naznačeny podmínky v jednotlivých místech České republiky.



Obr. 23 Sluneční mapy ČR [www.chmi.cz]

Při instalaci se pak přihlíží k orientaci fotovoltaických panelů. Jedná se o orientaci vzhledem ke světovým stranám a sklonu samotného panelu. Pokud se montáž provádí na zemi, je přizpůsobení orientace snadné. Pokud se však instalace provádí na střeše, je potřeba znát její sklon. V našich podmínkách je ideální sklon panelu 30°-35° a orientace na jih. Při menších změnách těchto hodnot dochází pouze k malým ztrátám energie. Avšak při větších změnách parametrů jsou ztráty již značné. Vliv těchto orientací jsou naznačeny na následujícím obrázku (Obr. 24).



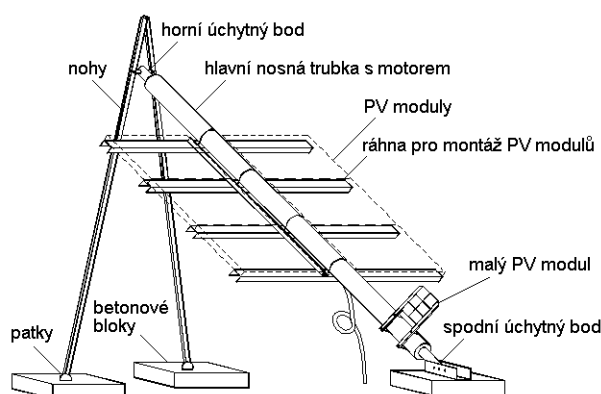
Obr. 24 Vliv orientace a sklonu na energetický výnos

Pro dosažení větší účinnosti a výkonu solárních panelů se mohou instalovat podpůrné komponenty:

- sledovače (trackery)
- koncentrátoři

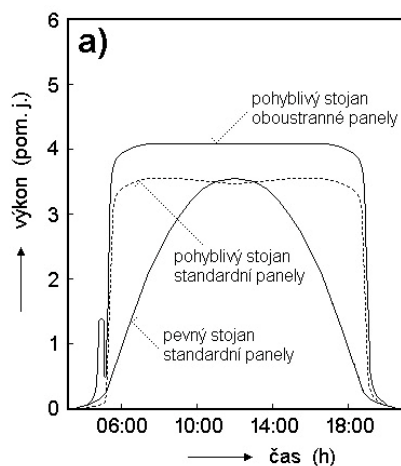
Sledovače slouží k automatické změně polohy panelů vzhledem k aktuální pozici slunce na obloze od rozednění po západ slunce. Konstrukce trackeru Traxle je z hliníkových profilů a jeho technické řešení je celosvětově chráněno patenty. Jeho řešení je poměrně jednoduché. Nosnou část, na kterou jsou uchyceny fotovoltaické panely, tvoří šikmo umístěná hliníková trubka orientovaná v ose sever/jih. V ní je umístěn stejnosměrný motor, který přes převod otáčí celým panelem. Zdrojem pro tento motor je malý oboustranný solární panel. Motor se natáčí podle toho, na kterou stranu malého fotovoltaického modulu dopadá sluneční záření. Hlavní výhody tohoto sledovače jsou tedy:

- Zvýšení výkonu až o 30%
- Jednoduchá instalace
- Bezúdržbový provoz
- Bezúdržbová konstrukce
- Práce v letním i zimním období
- Převodovka chráněná proti poryvům větrů
- Možnost úpravy na jakoukoliv velikost



Obr. 25 Systém Traxle

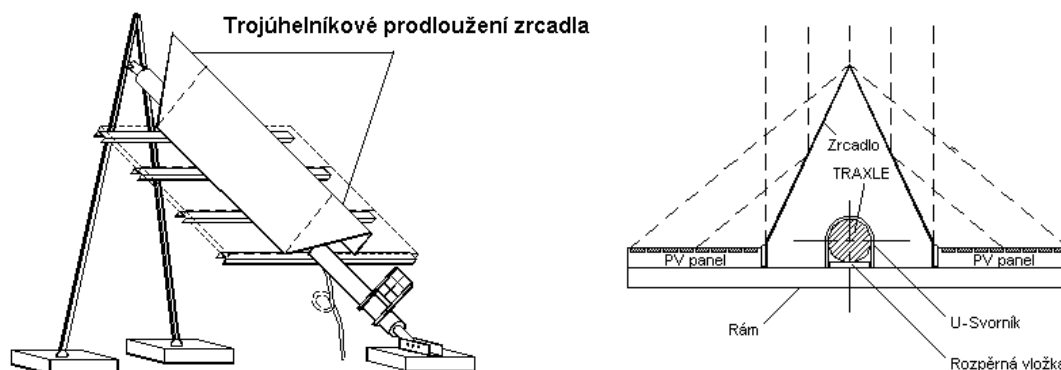
Na následujícím obrázku (Obr. 26) je znázorněna křivka výkonu pro jednotlivé typy zapojení a jejich využití během dne. Je patrné, že při pevném zapojení panelů dosahuje výkon svého maxima kolem poledne. Při použití natáčivého systému je stejného výkonu dosaženo už v brzkých ranních hodinách a výkon začíná klesat opět až ve večerních hodinách. Použitím oboustranných panelů je výkon ještě vyšší.



Obr. 26 Porovnání statického a pohyblivého solárního panelu

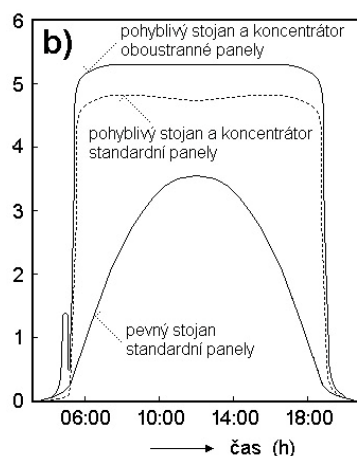
Další možností jak zvýšit výkon solárních panelů je použití solárních koncentrátorů. Tyto koncentrátory se kombinují s trackery. Tím je dosaženo vysoké efektivnosti ve využití slunečního záření během celého dne. U zrcadel je důležité, aby odrážely fotony s vlnovou délkou 300-1000 nm. Také musí odolávat povětrnostním podmínkám po dobu alespoň deseti let. Zrcadla se vyrábějí z těchto materiálů:

- Z válcovaného plechu z nerez oceli
- Z válcovaného hliníkového plechu
- Akrylátové fólie pokryté stříbrem
- Akrylátové fólie pokryté hliníkem



Obr. 27 Použití koncentrátorů a systému Traxle

Také pro aplikaci s koncentrátorem je uvedena křivka výkonu. V porovnání s předchozím grafem je patrný další vzrůst výkonu, oproti použití pouze trackeru. Oboustranné panely mají výhodu, že během dne využívají jak záření přímé, tak i odražené od zadní plochy na které je panel instalován.

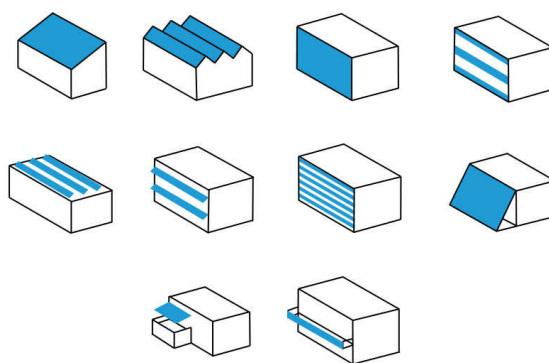


Obr. 28 Porovnání statického panelu s panelem vybaveným koncentrátorem a systémem Traxle

Jak již bylo zmiňováno v první kapitole, největší podíl na trhu mají monokrystalické panely, jejíž výroba je sice nákladná, ale zase dosahují větší účinnosti než polykrystalické panely. Monokrystalické panely však jsou méně účinné pro difúzní záření, proto je vhodné je použít společně s natáčecím systémem, který bude panely směřovat celý den proti přímému slunečnímu záření. Polykrystalické panely sice mají menší účinnost, ale oproti monokrystalickým pracují lépe s odraženým difúzním zářením. Nejsou navíc citlivé na změny polohy od ideální orientace (v ČR: směr jih a sklon 30-35°). V podmínkách České republiky je jejich použití vhodnější. Poslední technologii, která se komerčně nejvíce využívá, je fotovoltaický panel z amorfního křemíku. Tyto panely jsou známy především z kalkulaček, ale

k výrobě velkého množství energie se používají poměrně krátkou dobu. Jejich výroba je odlišná od předchozích dvou typů. Vyrábějí se napařováním křemíkové vrstvy na podkladový materiál, kterým může být sklo, plasty i kovy. Krystalické panely mají křemíkovou vrstvu tlustou kolem 3 mm, amorfnní mají tuto vrstvu tlustou pouze 0,001 mm. Toto se projevuje i na ceně, jelikož se při výrobě spotřebuje méně materiálu. I z energetického hlediska je výroba levnější. Nevýhodou je však, že pro dosažení stejného výkonu, jakého dosahují krystalické panely, je pro amorfnní panely potřeba přibližně dvounásobnou plochu. Na druhou stranu výhodou je menší teplotní závislost, tedy i lepší využitelnost během celého roku. Také dosahují lepších parametrů při zhoršených světelných podmínkách.

Fotovoltaické panely se dimenzují podle možností místní rozvodné soustavy. Musí splňovat podmínky, stanovené místním provozovatelem. Životnost panelů je ve většině případů minimálně 25 let s tím, že po této době neklesne jejich účinnost pod 80%. Z finančního hlediska je cena za instalovaný 1 kWp 70-120 tisíc. Cena je závislá na použité technologii. Stejně tak je i závislá plocha, která produkuje stejný výkon. Pohybuje se od osmi do šestnácti metrů čtverečných na jeden kWp. Cena však klesá s rostoucí velikostí solárního parku. Obecně se dá počítat, že solární panely u výkonu 1 kWp za rok vyrobí 950 kWh energie. [6,26,30]



Obr. 29 Možnosti instalace fotovoltaických panelů

3.2 Palivový článěk

Palivový článěk slouží k přeměně energie uložené ve skladovaném vodíku na energii elektrickou. Pokud je během dne zaručena dodávka z fotovoltaických panelů, popřípadě z akumulátorů, není třeba, aby palivový článěk byl v provozu. Jeho využití nastává, pokud nestane nedostatek elektrické energie. Palivový článěk je závislý především na zásobě vodíkového paliva, protože jako okysličovadlo lze použít atmosférický vzduch. Velikost vodíkového zásobníku nám tedy říká, jak dlouho je možno pracovat pouze s palivovým článkem. V systémech, uvedených v předchozí kapitole byly tyto zásobníky tak velké, že dokázaly zásobovat palivový článěk palivem po dobu až tří týdnů. Při návrhu takového systému, je třeba uvažovat s touto velikostí. Pokud by se jednalo o ostrovní režim, nebude větší

velikost zásobníku na škodu. Větší zásobník přináší také větší vyšší cenu. Taky se bere ohled na konkrétní aplikaci. Jiné požadavky budou pro průmysl, rodinný dům i malou stanici (monitorovací, telekomunikační).

Stejně jako fotovoltaických článků, tak i palivových článků je několik typů. Především se liší podle pracovní teploty. Pro malé aplikace se hodí především nízkoteplotní PEM články. Jejich provoz je méně náročný a levnější. Pokud uvažujeme instalaci v rodinném domě, jsou tyto články vhodné především z hlediska rychlého startu. Vysokoteplotní palivové články se používají pro velké aplikace, kde je potřeba velkého výkonu. Jsou však mnohem složitější než nízkoteplotní, jelikož pro jejich provoz je potřeba mnoho podpůrných komponent. Jejich pracovní teplota se pohybuje v rozmezí 600-1000°C. Vysokoteplotní články mají výhodu, že díky své vysoké teplotě dokážou samy rozkládat uhlovodíková paliva na vodík. Tím odpadá přítomnost zařízení, ve kterém palivo bude nejdříve rozkládat na vodík a teprve pak se jim zásobovat palivový článek. Tomuto procesu se říká vnitřní reforming. V této kapitole však vysokoteplotní palivové články nebudou dále rozebírány, protože u nich se nedá uvažovat se zapojením do hybridního systému s fotovoltaickými panely a elektrolyzérem. Také z ekologického hlediska toto není vhodné, protože jako palivo se používají právě uhlovodíkové paliva, které produkují kromě vodíku taky jiné emise (CO, CO₂ a podobně), i když v malém množství.

Komerčně využívané nízkoteplotní palivové články jsou zatím dostupné pouze omezeně. Většina současných instalací je především v testovacím režimu, nebo se jedná o laboratorní zařízení. Průkopníkem v oblasti využívání nejen palivových, ale i fotovoltaických článků v praxi se stává Japonsko. Japonská společnost Ebara společně s firmou Ballard vyvinula malou stacionární jednotku, pro klasické japonské domácnosti. Jednotka měla výkon 1 kW a dodávala jak elektrickou, tak i tepelnou energii. Jako palivo zde však byl zemní plyn, ze kterého se v reformátoru získává vodík. S podobným projektem v současnosti přichází i Panasonic. Na trh uvádí palivové články pro využití v domácnosti. Momentálně jejich výkon je také 1 kW a stejně jako produkt Ebara a Ballard, dokáže dodávat jak elektrickou energii, tak i teplo. Takto výkonné jednotky jsou schopny vytápět a zásobovat elektřinou byt s dvěma pokoji, koupelnou a kuchyní ve které bydlí čtyři osoby. Toto dostačuje pro klasické japonské byty, které jsou poměrně malé. Na evropský trh bude Panasonic dodávat jednotky s výkonem 3 kW. Také firma Fronius International GmbH začala s prodejem palivových článků s výkonem 4 kW.

Výhody při použití palivových článků jsou tyto:

- Nízké opotřebování
- Velká životnost (až desetitisíce hodin)
- Tichý chod (nepřítomnost pohyblivých předmětů)
- Snáší velká přetížení
- Ekologický provoz (PEM články)

Jak již bylo řečeno, palivové články mohou sloužit i v kogeneračních aplikacích (výroba tepla i elektřiny), protože jejich odpadem je teplo a voda. Výhoda oproti akumulátorům je ta, že akumulátor potřebuje na své dobíjení určitou dobu, ale palivový článek může začít pracovat ihned při obnovení dodávky paliva.

Nevýhodou u palivových článků je především vodík. A to z těchto důvodů:

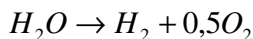
- Výroba je nákladná
- Špatně se skladuje
- Pokud není vodík dostatečně čistý, může dojít k poškození katalyzátoru

Samotný palivový článek, je pak třeba chránit před mrazem neustálým zahříváním, protože i nepatrné množství vody může společně s mrazem nevratně poškodit celý palivový článek. U palivových článků PEM je třeba stále udržovat vlhký elektrolyt i v době, kdy není v provozu.

[1,5,15,24]

3.3 Elektrolyzátor

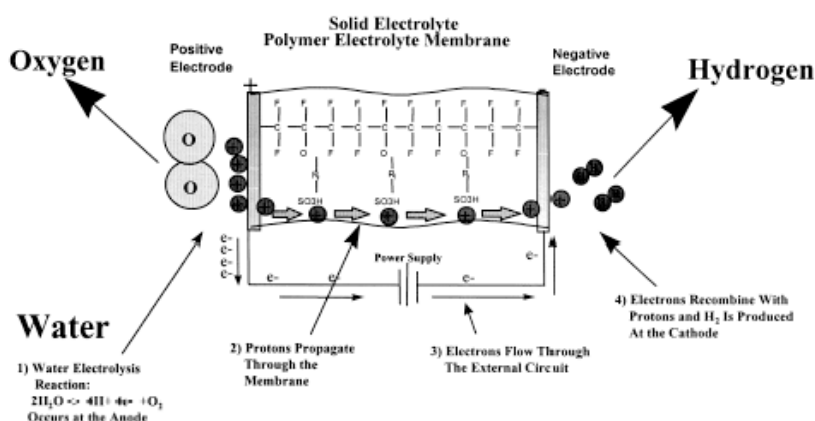
Elektrolyzátor slouží v tomto systému jako producent vodíku pro palivový článek. Jeho spuštění nastává v době, kdy je přebytek energie, protože jeho činnost je finančně náročná, proto je jeho spuštění takto řízeno. Důležitou vlastností elektrolyzátoru je, aby vyráběl pod takovým tlakem, který umožní jeho účinné skladování. Rozklad kapalné vody se děje podle následující rovnice:



$$\Delta H_{298}^0 = 286,26 \text{ kJ}$$

$$\Delta G_{298}^0 = 237,36 \text{ kJ}$$

Klasická metoda elektrolýzy je založena na rozkladu kyselého nebo zásaditého vodního roztoku elektrickým proudem. Tento proces nedosahuje však vysoké účinnosti (70%). Nejmodernější technologie výroby vodíku je elektrolýza horké páry, která má teplotu 900-1000 °C. Tím se dá dosáhnout účinnosti výroby až 85%. Také je možno získávat vodík parní reformací zemního plynu. U takto vyrobeného vodíku se však nedá mluvit o ekologicky čistém palivu, jelikož při jeho výrobě vzniká velké množství oxidu uhličitého. Pokrok v oblasti elektrolýzy nastal v době, kdy byl vyvinut elektrolyzátor typu PEM (Polymer Electrolyte Membrane). Tyto elektrolyzéry dnes dosahují takových tlaků vodíku, že je možno jej ihned skladovat. V minulosti se tyto elektrolyzéry využívaly především ve vojenských aplikacích (jaderné ponorky, letadla). PEM elektrolyzéry pracují na principu rozkladu vody pomocí platinového katalyzátoru. Na anodu se přivede kapalná voda, která se rozloží na molekuly vody O_2 , volné elektrony a kladně nabitá jádra vodíku. Tato jádra přejdou přes elektrolyt na katodu, kde se sloučí s volnými elektrony, které přešly z anody pomocí vnějšího okruhu. Při tomto sloučení vzniknou molekuly vodíku H_2 . Jelikož je elektrolyt pevný (polymerový) nedochází během přestupu kladně nabitých jader vodíků k žádné kontaminaci jinými látkami. S tímto elektrolytem je možno dosáhnout tlaku až 15 barů bez použití přídavného kompresoru.



Obr. 30 Popis funkce elektrolyzéru PEM

Dnes dostupné elektrolyzéry se zásaditým elektrolytem pracuje na střídavý proud. Pokud by se takovýto elektrolyzér připojoval do systému se solární elektrárnou a bateriemi, jenž pracují na stejnosměrný proud, musel by se použít k jeho napájení měnič DC/AC. Vhodné je použít elektrolyzéry pro stejnosměrný proud. To umožní přímé připojení do systému se stejnosměrným proudem, případně použít měnič DC/DC, sloužící k úpravě hladiny napětí nebo stabilizaci. [25]

3.4 Baterie

Baterie je nezbytnou součástí grid-off systému (ostrovní režim), kde slouží k uskladnění elektrické energie, protože poptávka po energii není většinou shodná s dodávkou energie ze solárních panelů. Ve večerních hodinách se je spotřeba větší z důvodů svícení a dalších elektrických spotřebičů (PC, TV, myčka...). K tomuto účelu se používají takzvané solární baterie, kterou jsou konstrukčně řešeny tak, aby vyhovovaly provozu se solárními panely. Podobají se staničním nebo trakčním bateriím. Startovací akumulátory jsou pro tento účel nepoužitelné. Instalovaná baterie musí splňovat několik podmínek:

- Minimální účinek samovybíjení (1-3% za měsíc)
- Dobrá účinnost při malých nabíjecích proudech
- Možnost pracovat cyklicky
- Možnost hlubšího vybíjení
- Dlouhá životnost
- Minimální teplotní závislost
- Minimální údržba (doplňování elektrolytu)

Údržba se může být snížena použitím gelových akumulátorů, kde nehrozí jejich vytečení. V současné době jsou nejvíce rozšířené baterie olověné. Kromě nich se používají také NiCd, NiFe, NiMH, Li-Ion.

V systému s palivovým článkem může baterie teoreticky sloužit jako hlavní zdroj v případě, kdy není solární elektrárna v provozu a uskladněný vodík jako záloha v době, kdy nepracují ani solární panely, ani baterie. Vzhledem k tomu, že fotovoltaické panely pracují dynamicky a jakákoliv změna osvětlení se projeví na výstupním výkonu. Během dne může docházet k častému stínění mraky. Dochází tedy k častému střídání přímého slunečního záření a difúzního osvětlení. Akumulátory musí být na tyto dynamické změny konstruovány. Proto se systémy vybavují speciálními solárními bateriemi.

Baterie pracující v takovémto systému jsou vybaveny automatickými regulátory, které řídí jejich dobíjení. Nabíjení je prováděno do určité napěťové hladiny, kdy baterie ještě nadměrně neplyne. Jelikož se solární články v noci chovají jako polovodičová dioda, mohlo by docházet k vybíjení baterií a zpětného toku proudu. Proto jsou regulátory vybaveny Schottkyho diodami s malým napěťovým úbytkem, které zamezují tomuto zpětnému vybíjení. Regulátor také musí zamezit, aby se baterie hluboko nevybíjela a automaticky ji odpojil od zátěže, pokud napětí klesne na minimální hodnotu. Ta je u olověných baterií 10,5 V (1,75 V na článek). Některé typy baterií mají své vlastní ochrany, takže instalovaný regulátor jimi už nemusí disponovat. Regulátory pro baterii pracují při napětích 12 nebo 24 V. Složitější zařízení mohou pracovat při obou napětích.

Baterie se umísťují do větraných místností co nejbližší k fotovoltaickým panelům. V místnosti by ideálně měla být stálá teplota během celého roku. Pokud tomu tak není, jsou regulátory u baterií vybaveny teplotní kompenzací. U akumulátorů typu NiCd a NiFe není tato kompenzace potřebná nikdy. [29]

3.5 Měníče napětí

Napětí používané během provozu solárního panelu a také baterii je většinou 12 nebo 24 V. Na tato napětí jsou konstruovány i regulátory. V domácnostech však jsou spotřebiče na napětí 230 V/50 Hz. Abychom dosáhli takového napětí, je třeba použít napěťový měnič, který převádí stejnosměrné napětí na střídavé 230 V/ 50 Hz. Na trhu existuje několik druhů měničů. Liší se především kvalitou výstupního napětí. Nejmeně kvalitní měniče mají výstupní napětí s obdélníkovým průběhem. Ten však je nevhodný pro mnoho spotřebičů. Vyhovuje pouze u zátěží s odporovým charakterem. Vyhovující pro běžné používání jsou měniče s lichoběžníkovým průběhem výstupního napětí. Nejlepší měniče mají výstupní průběh sinusový. Tak jak na akumulátory jsou kladeny nejrůznější požadavky, tak i měniče se musí vyznačovat jistými parametry:

- Vysoká účinnost přeměny (90-95%)
- Snadno kontrolovatelné
- Nejlépe automatický provoz
- Co možná nejmenší odběr pokud není zatížen
- Musí pracovat spolehlivě i při kolísání napětí na vstupní straně

- Odolná proti přepólování svorek
- Odolnost proti přepětí na vstupu měniče
- Na výstupní straně musí být průběh požadované kvality
- Vysoká stabilita napětí a kmitočtu na výstupní straně
- Možnost krátkodobého přetížení (1,5 násobek jmenovitého výkonu)
- Zkratová odolnost

Před instalací měniče je třeba u výrobce ověřit jeho možnosti. Krom odporových spotřebičů najdeme mnoho zařízení s indukčním nebo kapacitním charakterem. Pokud by měniče nedokázaly spolupracovat s těmito charaktery odběrů, mohlo by docházet k tomu, že by nakonec spotřebič nefungoval nebo by mohlo dojít k poškození vlastního měniče. Příčinou totiž mohou být spotřebiče, které mají velké, až několikanásobné, nárazové proudy. Malému systému se solární elektrárnou mohou problémy způsobovat například kompresorové lednice nebo asynchronní motory (indukční charakter). [3,19]

3.6 Návrh

Před začátkem plánování jednotlivých komponent je třeba stanovit spotřebu elektrické energie pro navrhovanou aplikaci. Výsledek bude sloužit pro volbu výkonů jednotlivých komponent, aby byla zajištěna spolehlivá dodávka elektrické energie. Návrh tedy vychází ze stanovení průměrné spotřeby energie ve watthodinách za den (Wh/den). Také je důležité vědět, jestli se energie bude dodávat po celý rok rovnoměrně, nebo zda budou období se větší, či menší spotřebou. Některé systémy mohou pracovat pouze v létě, popřípadě od jara do podzimu. Systémy pracující po celý rok, například rodinný dům, se mohou vyznačovat zvětšenou spotřebou v zimním období, kdy jsou dny kratší, a tedy se déle svítí v domácnostech.

Pro zjištění průměrné denní spotřeby energie se vychází z výkonu spotřebiče a délky jeho pracovního cyklu. Pro výpočet se tedy použije jednoduchý vzorec:

$$W (Wh) = P (W) \cdot t (h) , \quad (48)$$

kde W je spotřebovaná energie, P výkon a t doba činnosti. Pro příklad je uvedena tabulka (Tabulka 9) s některými spotřebiči, se kterými se v domácnostech normálně setkáme. U každého spotřebiče se určí jeho spotřeba energie za den. Po sečtení dostaneme denní průměrnou spotřebu energie. Pokud se systém bude umisťovat na již postavený objekt, je možné tuto spotřebu zjistit také sledováním elektroměru, nebo vypočítat podle výpisu plateb za elektřinu. Ze spotřebičů uvedených v tabulce (Tabulka 9) vychází denní průměrná spotřeba na 5150-7050 Wh/den.

Tabulka 9 – Příklad výpočtu denní spotřeby

Spotřebič	Příkon (W)	Doba činnosti (h)	Spotřeba (Wh/den)
úsporná žárovka	11	5	55
televize	100	8	800
lednice			800-2700
vysavač	650	0,5	325
počítač	100	5	500
pračka	400	3	1200
žárovka	100	5	500
mikrovlnná trouba	1300	0,5	650
rádio	80	4	320
Celková spotřeba	5150-7050		

Při stanovení velikosti průměrné denní spotřeby, je třeba navrhnout velikost fotovoltaické elektrárny. Tato hodnota se vynásobí koeficientem, který v sobě zahrnuje ztráty v podpůrných komponentech. Jako příklad uvedeme hodnotu vypočtenou v tabulce (Tabulka 9), tedy 5150 Wh/den, kterou vynásobíme koeficientem 1,3.

$$W_{PV} = 5150 \cdot 1,3 = 6695 \text{ Wh / den} \quad (49)$$

Aby solární panely pokryly spotřebu, musí dodat 6695 Wh/den.

Tabulka 10 – Průměrné denní globální záření pro Ostravu

Měsíc	Průměrné denní globální záření (kWh/m ²)
Leden	1,27
Únor	2,08
Březen	2,96
Duben	3,91
Květen	4,77
Červen	4,66
Červenec	5,01
Srpen	4,51
Září	3,35
Říjen	2,79
Listopad	1,32
Prosinec	0,94
Průměr za rok	3,14

V tabulce (Tabulka 10) jsou uvedeny hodnoty průměrného denního globálního ozáření pro Ostravu. Hodnoty jsou uvedeny pro každý měsíc v roce. Pro výpočet použijeme průměrnou roční hodnotu, která je $3,14 \text{ kWh/m}^2$. Pokud použijeme solární panel s plochou $1,61 \text{ m}^2$ a účinnosti 14% pak dostaneme energii, kterou za den vyrobí jeden solární panel.

$$1,61 \cdot 3,14 \cdot 0,14 = 0,708 \text{ kWh/den} \quad (50)$$

Pro návrh velikosti panelů se vychází z výtěžnosti fotovoltaických panelů během roku. Tato hodnota se udává ve Wh/Wp/den. Pro příklad jsou dané tyto hodnoty výtěžku:

- léto 4 Wh/Wp/den
- jaro až podzim 2 Wh/Wp/den
- zima 0,8 Wh/Wp/den

Dále je potřeba vzít v úvahu ztráty v měniči a akumulátorech. Koeficient beroucí v úvahu ztráty v obou zařízeních bude 1,3. Podle výše zmíněného výpočtu spotřeby se určí množství fotovoltaických panelů. Pro výpočet se použije hodnota 5150 Wh/den. Tato hodnota se vynásobí koeficientem pro ztráty.

$$5150 \cdot 1,3 = 6695 \text{ Wh/den} \quad (51)$$

Toto množství energie je tedy vyžadováno po solárních panelech. Výsledek se nyní podělí výtěžností panelů.

- Pro období léta - $6695/4 = 1673 \text{ Wp}$
- Pro období jaro až podzim - $6695/2 = 3348 \text{ Wp}$
- Pro období zima - $6695/0,8 = 8368 \text{ Wp}$

Tyto hodnoty představují požadovanou velikost instalovaného výkonu pro určenou spotřebu. Obecně se vychází z nejhorší možné varianty, aby byla zajištěná spolehlivá dodávka. Některé instalace jsou využívány pouze určité období v roce. Pokud by tedy byl objekt využíván pouze v létě, stačila by solární elektrárna o velikosti 1673 Wp. Pokud však bude využíván celoročně, musí se brát varianta se zimním obdobím, tedy 8368 Wp. Při použití solárních panelů o výkonu 230 Wp se určí počet těchto panelů následovně.

$$8368/230 = 36 \quad (52)$$

Bude tedy potřeba 36 panelů s tímto výkonem.

Pro výpočet velikosti akumulátoru se vychází ze stejné hodnoty spotřeby energie, která byla použita pro výpočet, tedy 6695 Wh/den. Při výpočtu se uvažuje i doba po kterou plně nabitá akumulátory budou napájet daný objekt. Pro tento případ bude tato doba tři dny. Kapacita akumulátorů bude tedy:

$$\frac{6695 \cdot 3}{12} = 1700 \text{ Ah} \quad (60)$$

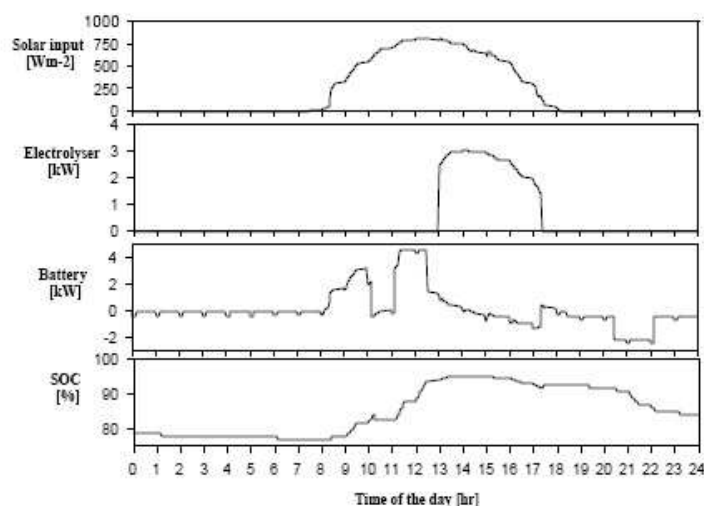
Komerční nasazení palivových článků se zatím neděje. Momentálně instalované články jsou v testovacím režimu, ale velké společnosti zabývající se touto problematikou vyvíjí kompletně vybavené zařízení založené na palivových článcích, které budou instalovány v domácnostech. Zde tedy nebude možnost individuálnějšího řešení tak, jak je to možné u fotovoltaických panelů. Výkony těchto vyvíjených palivových článků dosahují výkonu od 1 kW do 3 kW a postačují pro klasickou domácnost se čtyřmi osobami. [3,23]

4 Popis funkce řídicího systému – návrh základní logiky

Řídicí systém má za úkol kontrolovat stav jednotlivých komponent a podle toho následně upravovat jejich činnost tak, aby jejich využití bylo efektivní a byla zajištěna spolehlivá dodávka energie. Pro hybridní systém se solárními panely, akumulátory, elektrolyzérem a palivovým článkem je takovýto řídicí systém nezbytný. U takových systémů je žádoucí, aby pracovali samostatně, bezúdržbově a spolehlivě. Pro návrh řídicí jednotky se může rozebrat systém na jednotlivé části a u nich analyzovat hlavní aspekty, které ovlivňují chod celku:

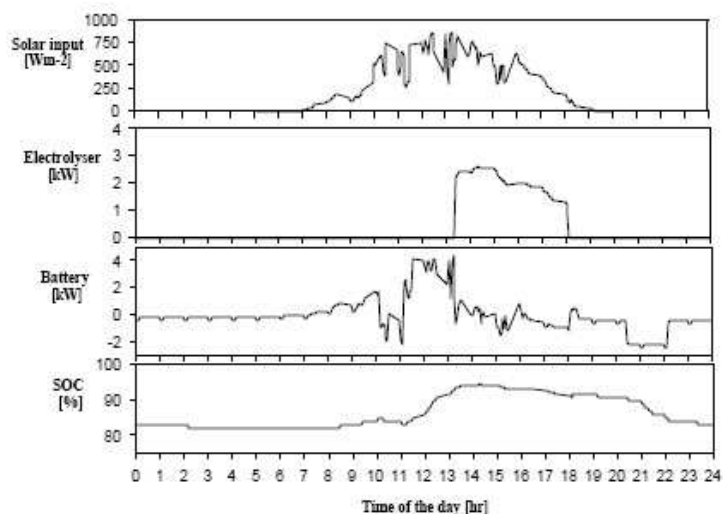
- Solární panely jsou především závislé na slunečním záření a na jeho intenzitě. Zjednodušeně lze říci, že pracují pouze přes den.
- Akumulátory jsou závislé na dobíjení a jejich pokles pod jistou hodnotu je nežádoucí, protože hluboké vybíjení zkracuje jejich životnost. Akumulátor je dimenzován na konkrétní aplikaci, avšak může nastat doba zvýšeného odběru a tak dochází k jeho rychlejšímu vybíjení.
- Elektrolyzér potřebuje pro výrobu vodíku stály příkon. Proto pokud není momentální nadbytek elektrické energie, je jeho činnost pozastavena. Taky je potřeba u něj zajistit dodávku vody pro elektrolýzu.
- Palivové články jsou závislé především na dodávce vodíku. Okysličovadlo je zajištěno většinou z atmosférického vzduchu.

Při návrhu se může vycházet ze zkušenosti již fungujících systému, které jsou uvedeny v druhé kapitole této diplomové práce. Na obrázku (Obr. 31) jsou graficky znázorněny průběhy jednotlivých komponent pro slunečný den. Na spodním průběhu (SOC) je zobrazen stav nabití akumulátorů. Tento stav kontroluje regulátor nabíjení, který dohlíží na šetrné nabíjení akumulátorů. K ránu je akumulátor nabit na 77% své kapacity. Přibližně v 8:00 začne solární elektrárna vyrábět elektrický proud (první průběh). Akumulátory se od této chvíle začínají nabíjet. V poledne je výkon solárních panelů na svém maximu a baterie jsou nabitě na přibližně 95%. Při dosažení této hodnoty se spustí elektrolyzér vyrábějící vodík. Solární panely nyní zásobují energii elektrolyzér i akumulátory, které se nyní udržují v nabitěm stavu. Přibližně v 17:30 klesne výkon solárních panelů téměř na nulu. Není už dostatek energie, a tak se odpojí elektrolyzér. Od této chvíle již je napájení pouze z akumulátorů.



Obr. 31 Denní charakteristika hybridního systému pro slunečný den

Na obrázku (Obr. 32) je uveden podobný průběh pro zamračený den. Na první pohled je patrná velká dynamika fotovoltaických panelů, která se projeví i na ostatních zařízeních. Výkon se mění skokově mezi hodnotami 750 a 250 W/m². Vzhledem k těmto častým změnám se systémy vybavují bateriemi, které jsou konstruovány pro tento účel.



Obr. 32 Denní charakteristika hybridního systému pro oblačný den

Jednotlivé komponenty bývají vybaveny vlastním řídicí jednotkou, která řídí jeho chod na základě vlivů ostatních komponent. Takovéto řešení se uskutečňuje proto, protože každé zařízení vyžaduje jiné podmínky pro svou činnost. Z výše uvedených informací vidíme, že provoz akumulátorů je řízen na základě vyhodnocení aktuálního stavu činnosti fotovoltaické elektrárny, stavu nabití a momentálního odběru. Řídicí systém tedy vytvoří vazbu mezi komponenty. Pokud je během dne dostatek energie, akumulátory se nabíjejí a po jejich dobití

dochází k jejich udržování. Pro bezúdržbové olověné akumulátory, které se pro tyto systémy nejčastěji používají, je nejvhodnější použít dobíjení konstantním napětím. Pokud je výkon solárních panelů nedostačující a nedokážou pokrýt poptávku po elektrické energii, jsou akumulátory připojeny, aby vyrovnaly tento rozdíl. Pro krátkodobé špičkové odběry lze použít i superkapacitory. V době, kdy solární panely nejsou v činnosti (od večera do rána) slouží jako zdroj energie právě akumulátory.

Pokud nastane stav, že fotovoltaické panely i akumulátory nedodávají dostatek elektrické energie, řídicí systém tento stav vyhodnotí a spustí palivový článek. Pro tyto účely se hodí PEM články, které se vyznačují téměř okamžitým startem. Palivový článek bývá vybaven svou vlastní startovací baterií, takže se dokáže spustit bez vnější dodávky elektrické energie. Délka samostatného chodu palivového článku je pak závislá na velikosti zásobníku vodíku. Sledovat stav zásoby vodíku, je také předmětem řídicího systému. Základní pravidla pro řídicí systém se dá shrnout takto:

1. Monitoring stavu vodíku a generované solární energie a jejich porovnání s poptávkou.
2. Vydávání příkazů k ovládání ventilů pro dodávku paliva palivovým článkům a řízení napájení
3. Vydávání příkazů k provozu elektrolyzérů s cílem využít přebytek energie k výrobě vodíku pro budoucí použití, tj. v případě potřeby.

4.1 FUZZY logika

V současné době se pro řízení takovýchto systému používají jednotky založené vední disciplíně označované SC-SOFT Computing. Ta do sebe zahrnuje různé druhy výpočtových postupů a snaží se nabídnout možnosti, které nám nenabízí klasická booleovská logika. Jedním z hlavních představitelů tohoto oboru je Fuzzy logika. Její využití je široké. V tomto případě bude sloužit pro řízení. V praxi se dnes s ní setkáme například u praček s automatickou úpravou teploty vody nebo u televizorů, které samy nastavují kontrast a jas na základě vnějších podmětů. Společnost Mitsubishi používá tento druh řízení pro výtahy. Také se používá například pro automatické rozpoznávání obrazů a podobně.

Fuzzy logika rozšiřuje základní logické operátory na takzvané fuzzy množiny. V klasické logice existují pouze dvě proměnné $\{0,1\}$, kde jsou těmito proměnnými hranice přesně definovány a prvek tedy nabývá pouze hodnot PRAVDA/NEPRAVDA. Naopak fuzzy logika má sice stejně stanovené hranice $\{0,1\}$, ale prvek může v tomto případě nabývat jakékoliv hodnoty v tomto intervalu. Fuzzy můžeme přeložit jako „neurčitý“, což odpovídá jeho možnostem. Jedná se tedy o víceproměnnou logiku. Fuzzy logiku fuzzy množiny a lingvistické proměnné. Lingvistická proměnná slouží k popisu empirických zkušeností. Pomocí ní můžeme například popsat tlak v zásobníku vodíku, který se mění. Hodnota lingvistické proměnné tlaku vodíku označíme jako prvek z množiny $\{\text{Nulový, Malý, Střední, Vysoký, Maximální}\}$. Pro tuto množinu se následně vytvoří charakteristická funkce označovaná také jako funkce příslušnosti. Ta popisuje jak moc je daný prvek příslušný příslušné množině. Jako příklad uvedu stolitrovou tlakovou láhev na vodík, ve které je 40 litrů vodíku. Zavedením dvou fuzzy množin (plná a

prázdná) bude tato láhev 0,6 prázdná a 0,4 plná. Čísla tedy znamenají stupeň příslušnosti k dané množině. Přiřazování těchto stupňů se nazývá fuzzyfikace. Příklad dalších lingvistických proměnných je uveden níže, kde jsou tyto proměnné označeny také zkratkami (termy).

Lingvistická proměnná	označení lingvistické hodnoty - termy
1. Vzdálenost	nulová, blízká, střední, velká, obrovská
2. Úhel	záporný, nulový, kladný
3. Tepelný výkon	ZV, ZS, NU, KS, KV
4. Teplota	ZV, ZS, ZM, NU, KM, KS, KV
5. Regulační odchylka	ZV, ZS, ZM, ZN, NU, KN, KM, KS, KV
6. Otevření ventilu	NU, KN, KM, KS, KV
7. Přírůstek regulační odchylky	záporný (Z), kladný (K)

Vysvětlení termů je v následující tabulce:

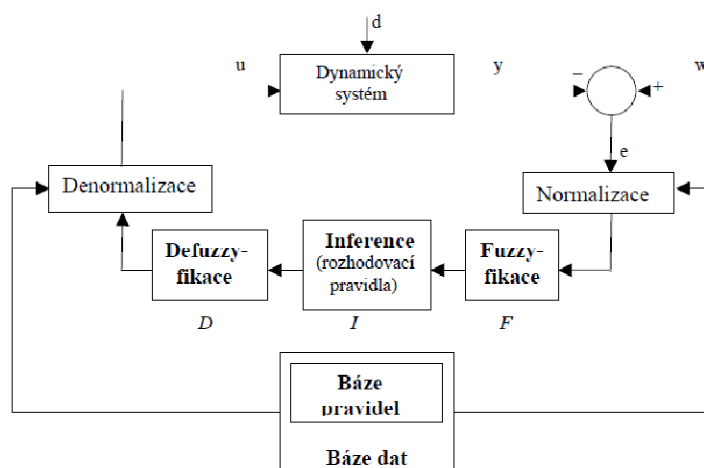
Tabulka 11 – České a Anglické označení termů

Význam	Ozn. Čes.	Ozn. Ang.
Hodnota velká záporná	ZV	NL
Hodnota střední záporná	ZS	NM
Hodnota malá záporná	ZM	NS
Hodnota záporná blízká nule	ZN	NZ
Hodnota nulová	NU	Z
Hodnota kladná blízká nule	KN	PZ
Hodnota malá kladná	KM	PS
Hodnota střední kladná	KS	PM
Hodnota velká kladná	KV	PL

Základem řídicího systému s fuzzy logikou je báze znalostí, která se opírá o praktické znalosti člověka. Tato báze se dále dělí na

- Bázi dat
- Bázi pravidel

Báze dat do sebe zahrnuje definované stavy, pracovní intervaly vstupních a výstupních veličin, minimální a maximální hodnoty. Báze pravidel obsahuje strategii řízení, aby byla dosažena požadovaná hodnota a správně stanovená akční veličina. Struktura fuzzy regulátoru je pak zobrazena na obrázku (Obr. 33). Do bloku Normalizace se přivádí naměřená fyzikální hodnota, která se v něm upraví na normalizovanou hodnotu, zpracovatelnou tímto systémem. Takto upravená hodnota se předá do bloku fuzzyfikace, kde se hodnota převede na fuzzy data. V bloku interference se na základě rozhodovacích pravidel vytvoří ze vstupní množiny množina výstupní. Následně se v bloku defuzzyfikace převede tato množina na výstupní veličinu, která se nakonec denormalizuje. [35, 36]



Obr. 33 Struktura fuzzy regulátoru.

5 Měření charakteristik klíčových komponent systému s akumulací energie do vodíku

Úkolem praktického měření bylo zjistit schopnosti využití hybridního systému fotovoltaických a palivových článků a akumulaci energie do vodíku. Měření probíhalo v laboratoři palivových článků na VŠB TU Ostrava.

Klíčové komponenty, které byly předmětem měření byly tyto

- Solární panely
- Palivové články Ballard
- Nabíjecí stanice Sunny Island Charger
- DC/AC měnič Sunny Boy pro fotovoltaické panely
- DC/AC měnič Sunny Boy pro palivové články
- Elektrolýzér Hogen GC

Měření probíhalo od ranních hodin, až do večerních. Start byl v čase 9:31 a konec v 18:31. Celkem se tedy jednalo o devět hodin. Během této doby se ve fotovoltaických panelech vyráběla elektrická energie, která přes DC/AC měnič napájela dva elektrolýzéry Hogen GC. Ty pak vyráběly vodík, jenž se skladoval v tlakových láhvích. Uskladněný vodík následně sloužil jako palivo pro palivový článek. Jelikož předmětem měření byla akumulace energie do vodíku, sledovalo se kolik energie se použije na jeho výrobu a uskladnění a kolik energie pak z tohoto množství vodíku dostaneme, použijeme-li jej pro palivový článek. Právě nasazení palivových článků bylo předmětem druhého měření. Pro výrobu elektrické energie se použil stejné množství vodíku, které bylo vyrobené elektrolýzou. Jelikož měření probíhalo dvakrát pro zátěž 1000 W a 500 W, byl vodík dodáván i z jiného zásobníku vodíku, ale vždy se použilo stejné množství, které se vyrobilo.

Jelikož měření začalo v době, kdy nebylo sluneční záření dostatečné, nemohly fotovoltaické panely vyrobit množství elektrické energie, která byla potřebná pro provoz elektrolýzérů. Proto zbytek energie byl hrazen z akumulátorů. Teprve od 10:45 byl na solárních panelech výkon potřebný pro jejich provoz. Solární panely od této chvíle sloužily jako zdroj pro elektrolýzéry i pro nabíjení akumulátorů. Přibližně o hodinu později v 11:46 dosáhly akumulátory stavu plného nabití a odebíraný výkon pak klesl na hodnotu, potřebnou pro provoz elektrolýzérů. V 17:45 začal klesat výkon solárních panelů a nedostatečné zásobení energií bylo hrazeno opět z akumulátorů. Po devíti hodinách v 18:31 bylo měření ukončeno. Během této doby se neustále vyráběl vodík, který se skladoval v tlakových láhvích. Na řadu přišlo druhé měření. Pomocí palivových článků se vyráběla elektrická energie, která se dodávala do veřejné sítě.

Na počítačích byly pomocí monitorovacích softwarů zaznamenávány nejdůležitější hodnoty napětí a proudů na jednotlivých komponentech. Jejich analýzou se pak určovaly další parametry, jako je účinnost zařízení, vyrobená a spotřebována energie. Při měření na fotovoltaické části odebíral počítač vzorky desetkrát za vteřinu. Zároveň se každých deset minut

zapisovaly hodnoty výkonů elektrolyzérů pomocí měřiče Voltcraft plus energy logger 3500, zapisoval se aktuální tlak elektrolyzérů a množství vyrobeného vodíku. Při druhém měření na palivových článcích se provádělo podobné monitorování pomocí počítačů. Činnost palivového článku se kontrolovala softwarem dodaným výrobcem Ballard Power Systém. Aby bylo možno hlídat množství spotřebovaného vodíku, hlídal se i průtok paliva, který se také zaznamenával.

5.1 Popis komponent

Solární panely použité pro účel měření se nacházely na střeše laboratoře palivových článků. Jednalo se o dvanáct panelů polykrystalických křemíkových panelů Schott Poly 165 od firmy SCHOTT Solar AG. Špičkový výkon každého panelu je 165 Wp, jmenovité napětí 35 V a jmenovitý proud 4,7 A. Každý panel je tvoří 72 článků a celkový rozměr jednoho panelu je 1,62x0,81 m.

Palivový článek byl typu PEM od firmy Ballard Power Systém, která vyvinula kompletní přenosný modul, nesoucí označení Nexa. Ta do sebe zahrnuje samostatný stack palivového článku a další podpůrné zařízení, zajišťující dodávku paliva a okysličovadla k reakci, zvlhčování vzduchu produktovou vodou, chlazení pomocí ventilátoru. Dále je vybaven snímači, sledující celou řadu veličin. Vše je zpracováno v procesorové jednotce. Celý modul je možno připojit k počítači a pomocí monitorovacího softwaru sledovat průběhy jednotlivých veličin. Celkový výkon Nexa modulu je 1200 W. Napětí se pohybuje v závislosti na podmínkách a zatížení od 22 do 50 V. Hodnota nominálního napětí je 26 V a jmenovitý proud je 46 A. Palivo je vodík s čistotou 99,99%. Jako okysličovadlo je použit vzduch, který je zvlhčován a pod tlakem vháněn do stacku. Prostředí může být jak vnitřní, tak i venkovní. Ovšem je důležité aby byl systém chráněn před prachem, pískem, deštěm a taky před vysokou, nebo naopak nízkou teplotou okolí (3°C -30°C). Rozměry jsou 56 x 25 x 33 cm (d,š,v). Ačkoli je samotný palivový článek tichý, je hluchnost celého modulu 72 dB ze vzdálenosti jednoho metru.

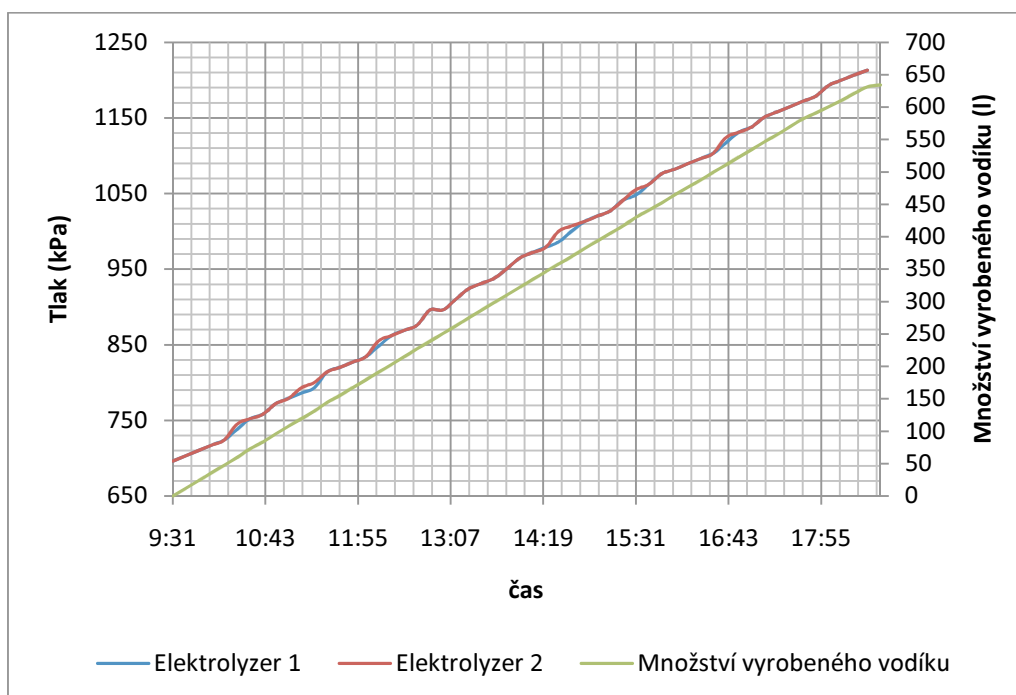
Měniče pocházely od firmy SMA Solar Technology. Především se jednalo o DC/AC měniče, z nichž se napájely při prvním měření oba elektrolyzéry a při druhém měření se přes ně dodávala energie do sítě. Také byl použitý DC/DC, který sloužil jak k dobíjení akumulátorů, tak i k rozvodu ustáleného stejnosměrného proudu. DC/DC měnič Sunny Island Charger je univerzálně použitelný přístroj s širokým rozsahem vstupního stejnosměrného napětí, vhodný pro většinu fotovoltaických panelů. Má v sobě zabudovaný moderní MPP Tracking, díky kterému dosahuje o 15-30% větší výnosy, než u klasických regulátorů. Jeho instalace je velmi snadná. Základní parametry si dokáže nastavit sám. Také jeho konstrukce umožňuje nasazení i v drsných podmínkách, a díky absenci ventilátoru, je jeho provoz také bezhlučný. Pracuje při napětích 12/24/48 V a snese výkon solárních panelů až do 2100 W. Maximální stejnosměrné napětí 140 V a proud 40 A. Jeho účinnost je udávána 98%. Také obsahuje několik základních ochranných, jako je ochrana proti přepólování, zkratu, přetížení, přepětí a podpětí a teplotní ochrana. Střídače, které sloužily k napájení elektrolyzérů pocházely také z řady Sunny Island firmy SMA. Tyto střídače se hodí pro malé a střední ostrovní systémy s výkony do 5 kW. Stejně jako výše zmiňovaný DC/DC měnič, se i tento vyznačuje výbornými vlastnostmi, vysokou účinností

(95%), možnosti nasazení v drsných klimatických podmínkách. Vstupní napětí je 48 V. Výstupní AC napětí lze nastavit v rozsahu 202-253 V. Jmenovitý proud je 18 A s možností přetížení až na 100 A po dobu 10 ms. Také výkonově se tento měnič dá přetěžovat. Trvalý výkon při pokojové teplotě je 4200 W, ale po dobu tří sekund může být přetěžován až na hodnotu 11400 W. Ochrany jsou podobné jako u předešlého měniče, ale obsahuje taky kontrolu stavu akumulátorů a chrání je proti hloubkovému vybití. Posledním použitým měničem byl střídač DC/AC jenž byl konstruován pro dodávku energie do veřejné rozvodné sítě. Také to byl výrobek SMA s typovým označením SWR 1100. Tento model je taky univerzálně použitelný v nejrůznějších AC sítích a to díky svému galvanickému oddělení vstupu a výstupu. Maximální výstupní výkon je 1100 W. Jmenovité napětí na vstupu 25 V a na výstupu 230 V/50 Hz (220-240 V/50 Hz). Účinnost tohoto měniče je udávána 92%.

Elektrolyzéry pracovaly v tomto měření dva. Jednalo se o PEM (Proton Exchange Membrane) elektrolyzéry HOGEN GC 600, pracující na střídavé síťové napětí 230 V/50 Hz. Pro svůj provoz vyžadují nepřetržitou dodávku deionizované vody. Čistota vyrobeného vodíku je 99,9999% a množství které produkuje je u tohoto modelu 600cc/min. Maximální tlak je 13,8 bar. Dokáže pracovat bez přestávky po celý rok. Konstruktivně se hodí k použití do laboratoří a lehkého průmyslu. [17,18,19,22,31]

5.2 Výstup měření

Z první části měření na fotovoltaických panelech vyšly následující hodnoty. Fotovoltaické panely vyrobily během měření 6989 Wh energie. Jak již bylo popsáno výše, byla v ranních hodinách energie dodávána jak ze solárních panelů, tak i z akumulátorů, které dodaly 1065 Wh. Celkem tedy množství vyrobené energie bylo 8054 Wh. Celkově se do tlakových láhví vyrobilo 634,2 l vodíku. Během měření byl zaznamenáván i tlak vodíku. Závislost množství vyrobeného vodíku a tlaku je zobrazena na následujícím grafu.



Obr. 34 Závislost tlaku a množství vyrobeného vodíku

Z měřených hodnot se daly také vypočítat účinnost měničů napětí, které byly použity v první části měření. DC/DC měnič Sunny Island Charger pracoval s účinností 98%, která se shoduje s hodnotou z katalogu výrobce. Měnič DC/AC Sunny Island dosahoval účinnosti 95%. Také tato hodnota se shoduje s účinností uvedenou v katalogu.

Tabulka 12 – Výsledky první části měření

Účinnost DC/DC měniče Sunny Island Charger	Změřená 98% Katalogová 98%
Účinnost DC/AC měniče Sunny Island	Změřená 95% Katalogová 95%
Energie získaná ze solárních panelů během celého měření (9 hodin)	6989 Wh
Energie získaná ze střídače Sunny Island během celého měření (9 hodin)	8054 Wh
Energie dodaná akumulátory během celého měření (9 hodin)	1065 Wh
Energie spotřebovaná elektrolyzéry během celého měření (9 hodin)	2x2200 Wh
Množství vyrobeného vodíku v elektrolyzérech	634,2 l

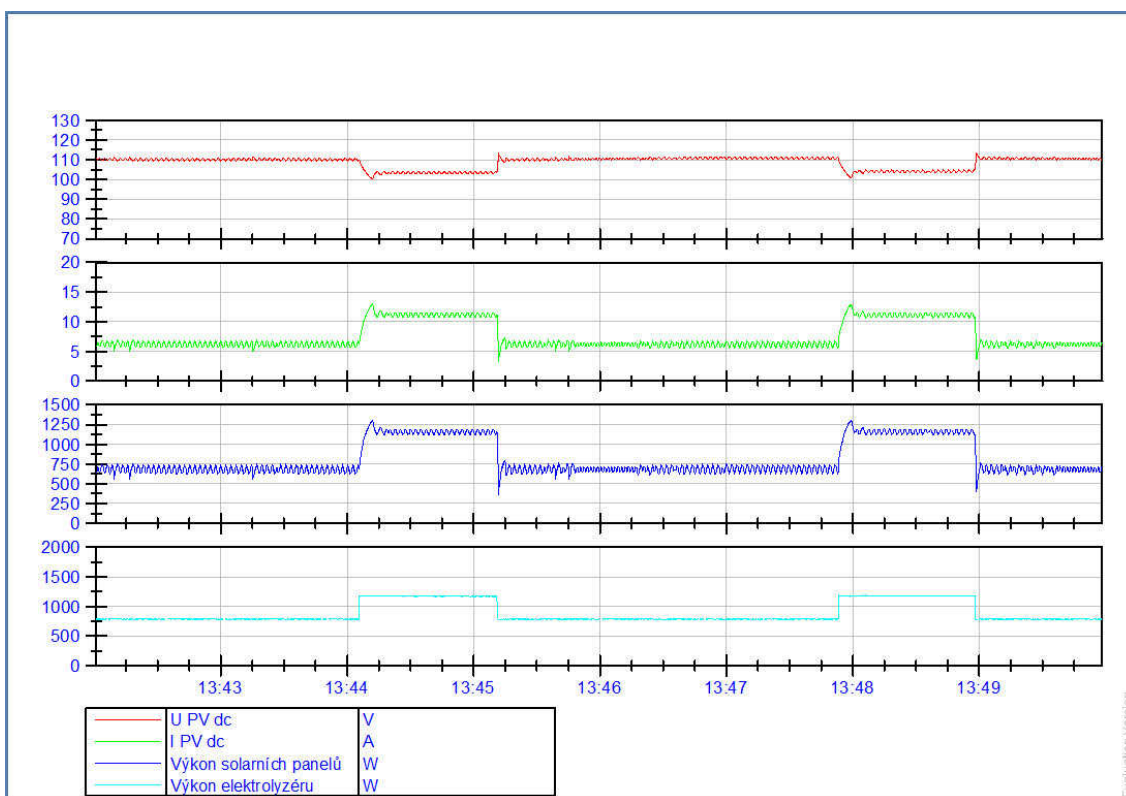
Během měření na solárních panelech docházelo ke krátkodobým skokovým změnám napětí a proudu. Jednalo se o MPP Tracking (Maximum Power Point Tracking). Tento systém slouží k automatické úpravě elektrického zařízení s cílem dosáhnout největšího možného výkonu, při aktuálních podmínkách. Solární panely jsou závislé na teplotě, osvětlení, zastínění a vlastnostech materiálů a každá změna těchto parametrů vede ke změně odporu fotovoltaického

článku. Výsledkem je nelineární AV charakteristika, na které se nalézá bod maximálního výkonu. Tento bod je dán napětím U a proudem I . Podle Ohmova zákona odpovídá těmto dvěma veličinám odpor $R=U/I$. Výkon je pak dán $P=UI$. Napětí a proud mají exponenciální vztah a místo maximálního výkonu se nachází v místě kde:

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad (61)$$

V tomto místě se charakteristický odpor fotovoltaického článku rovná odporu zátěže. Klasické měniče provádějí tyto měření pro celé pole solárních panelů najednou. Avšak všechny panely v tomto poli nemusí pracovat při stejných podmínkách (znečištění, zastínění části panelu, rozdílné napětí a podobně) a jejich aktuální výkon se může lišit. Proto je takovéto měření nepřesné a dochází u něj ke ztrátám energie. Moderní měniče dokážou provádět MPPT pro každý panel zvlášť a tedy individuálně upravovat jejich výkon.

Podobné špičkové odběry měly i použité elektrolyzéry (Obr. 35). Jejich stálý výkon byl přibližně 300 W. V pravidelných intervalech však docházelo k náhlému zvýšení výkonu až k hodnotám 770 W. Tuto skutečnost však nelze jednoznačně zodpovědět, protože elektrolyzéry se dodávají již jako hotové produkty, kde si firma chrání se know-how. Můžete to však souviset s tlakováním vodíku uvnitř elektrolyzéro.



Obr. 35 Špičkové odběry elektrolyzéro

Druhá část měření zaměřená na využití vyrobeného vodíku jako paliva pro palivový článek probíhala následovně. Palivový článek byl připojen do sítě přes DC/AC měnič. Zároveň byla nastavená elektronická zátěž. Nejdříve byla nastavena zátěž 1000 W a poté 500 W. Palivový článek pracoval při těchto zátěžích do doby, než spotřeboval stejné množství vodíku, které bylo vyrobené elektrolýzou. Obě měření byla monitorována jak dodaným softwarem pro palivový článek Ballard, tak i monitorovacím programem v prostředí LabView. Použitím hodnot z těchto měření, bylo možno dopočítat výkony jednotlivých komponent a také účinnosti.

V první části měření vyšly účinnosti stejně, jak udával výrobce. V druhém měření byly tyto účinnosti o 4% nižší než udává výrobce.

Jednotlivé změřené průběhy jsou uvedeny v příloze diplomové práce a jejich popis je uveden na konci této kapitoly.

Tabulka 13 – Výsledky druhé části měření

	Zátěž 1000 W	Zátěž 500 W
Vypočtená účinnost měniče SWR 1100	88%	88%
Maximální účinnost udávána výrobcem	92%	92%
Doba spotřeby vyrobeného množství vodíku (634,2 l)	37 minut	78 minut
Průměrná spotřeba vodíku pro palivový článek	17 l/min	8 l/min
Teplota stacku	65°C	51°C
Počet profuků stacku	79	90
Energie spotřebována	672 Wh	751 Wh

5.3 Popis příloh

5.3.1 Příloha 1.

Tato příloha zobrazuje celý průběhy prvního měření na fotovoltaických panelech. Hodnoty $U_{PV\ dc}$ a $I_{PV\ dc}$ představují napětí a proud na solární elektrárně, instalované na střeše laboratoře. Charakteristika $I_{BAT\ dc}$ zobrazuje napětí na baterii. Poslední, spodní průběh představuje výkon solární elektrárny, který byl dodatečně dopočten. Celé měření je možno rozdělit do třech hlavních úseků. První úsek (od počátku měření do přibližně 11:45) zobrazuje postupné zvyšování výkonu fotovoltaických panelů a spolupráce s akumulátory. Druhý úsek (11:45-17:40) charakterizuje dobu, kdy fotovoltaický panely již mají dostatečný výkon, aby napájely elektrolyzéry bez pomoci akumulátorů. Během této doby jsou akumulátory udržované nabitě. Poslední část (po 17:40) představuje konec měření. Fotovoltaické panely již neměly dostatečný výkon a požadovaný rozdíl se hradil z akumulátorů. Na průbězích je patrný pokles výkonu v okamžiku, kdy baterie byla nabitá. Tento pokles je detailněji zobrazen v Příloze 6.

5.3.2 Příloha 2.

Druhá příloha ukazuje dva průběhy. Na horním je vidět napětí na baterii a na druhém proud tekoucí z nabíječe Sunny charger. Také tento průběh je znázorněn celý. Napětí baterie je po nabití 57,5 V. Proud se pohybuje kolem hodnoty 11 A.

5.3.3 Příloha 3.

Tento průběh zobrazuje napětí a proud na vstupu DC/AC měniče Sunny Island. Špičkové hodnoty patrné především na spodním průběhu proudu jsou způsobeny elektrolyzérem. Detail zvýšených odběrů elektrolyzéro je ukázán v Příloze 8. Napětí je opět 57,5 V.

5.3.4 Příloha 4.

Podobně jako předešlá příloha zobrazuje tato výstup z DC/AC měniče Sunny Island. Proud tekoucí z tohoto měniče je přibližně 3,5 A a napětí je síťové 230 V/50 Hz. Opět je průběh pro celé měření.

5.3.5 Příloha 5.

V této příloze je na základě změřených hodnot dodatečně dopočten příkon elektrolyzéro. Jeho hodnota je přibližně 800 W, avšak v přibližně pravidelných intervalech se příkon zvýší na téměř 1200 W.

5.3.6 Příloha 6.

Zde je ukázána doba, kdy se baterie plně nabila a došlo k výraznému postupnému poklesu výkonu.

5.3.7 Příloha 7

Zde jsou zobrazeny dvě oblasti kdy došlo k zastínění fotovoltaických panelů a tedy ke snížení výkonu. První, menší, pokles je zaznamenán v čase mezi 15:00 až 15:15. Tento jev trval poměrně krátkou dobu (asi 3 minuty). Druhý, větší, pokles nastal v době 15:37 a trval až do 16:05. V tomto časovém období se výkon měnil skokově v intervalu 250 až 1400 W. V tuto chvíli byl nedostatek energie hrazen z akumulátorů. Toto zastínění panelů je pozorovatelné u všech předešlých průběhů.

5.3.8 Příloha 8.

Detail zvýšených odběrů elektrolyzérem. Standardní odběr je 800 W a zvýšený 1200 W, tak jak je popsáno v příloze 5. Délka trvání špičkového odběru elektrolyzéro je asi jedna minuta. Tyto impulsy se opakují v pravidelných intervalech. Napětí $U_{230\text{ ac}}$ představuje síťové napětí. $I_{ELC\text{ ac}}$, proud odebíraný elektrolyzérem.

5.3.9 Příloha 9.

Průběhy ukazují vliv elektrolyzéro na napětí a proud na DC straně střídače, tedy na vstupu. Kromě krátkého přechodového jevu na začátku a konci každého zvýšení příkonu

elektrolyzéro, je napětí udržováno na přibližně stejné hodnotě. Pouze proud se mění rozmezí 14-22 A.

5.3.10 Příloha 10.

Tato příloha obsahuje charakteristiky na konci prvního měření. Přibližně v 17:45 klesné výkon solárních panelů pod výkon, který je potřebný pro provoz elektrolyzéro. Od tohoto okamžiku, až do konce měření spolupracuje fotovoltaická elektrárna s akumulátory.

5.3.11 Příloha 11.

Zde zobrazené průběhy se týkají již druhého měření na palivových článcích. Příloha 11. Ukazuje síťové napětí (U_{Iac1+2}) a proud (I_{ac2}) v době, kdy byla na palivový článek připojena elektronická zátěž 1000 W. Průběh výkonu je dodatečně dopočten a zobrazen na spodním průběhu.

5.3.12 Příloha 12.

Pro tuto přílohu platí stejný popis, jak v předešlém případě. Je zde však změněna velikost připojené zátěže na 500 W.

5.3.13 Příloha 13.

První průběh zobrazuje výkon přímo na stacku palivového článku při zátěži 1000 W. Výkon stacku v tomto případě dosahuje hodnoty přibližně 1200 W. Před střídačem DC/AC je tento výkon již asi 1140 W. Tento rozdíl se je dán ztrátami a vlastní spotřebou palivového článku (Příloha 15.). Za střídačem je výkon zátěže 1000 W.

5.3.14 Příloha 14.

Opět této příloze odpovídá popis předešlé přílohy. Opět je výkon zátěže změněn na 500 W. Výkon stacku je přibližně 590 W, na vstupu do měniče je 570 W. Opět rozdíl odpovídá vlastní spotřebě (Příloha 16.) a ztrátám. Poslední průběh představuje výkon odebíraný z výstupu měniče.

5.3.15 Příloha 15.

Vlastní spotřeba palivového článku při zátěži 1000 W. Více v popisu k Příloze 13.

5.3.16 Příloha 16.

Vlastní spotřeba palivového článku při zátěži 500 W. Více v popisu k Příloze 14.

5.3.17 Příloha 17.

Zde je porovnávána velikost napětí ($Stack V$) a proudu ($Stack I$) stacku s velikosti stejných veličin na výstupu celého palivového článku. Rozdíl těchto hodnot je dán opět ztrátami a vlastní spotřebou palivového článku.

Závěr

Diplomová práce se zabývala možností využití bivalentního provozu fotovoltaických a palivových článků. O obou těchto popisovaných zařízeních se hovoří jako o ekologických zdrojích elektrické energie. Fotovoltaické panely v ČR v současnosti dosáhly velkého rozmachu díky podporám a možnostem finančního výnosu. Tato práce se nezabývá však finančním hodnocením, ale snaží se nastínit možnosti využití spolupráce dvou zařízení pro výrobu energie.

Kromě teoretického popisu byly i uvedeny popisy systémů, které jsou již dnes nasazeny v praxi. Tyto systémy pracují s různou velikostí výkonu a po různou dobu. Všechny však slouží k ověření činnosti tohoto hybridního systému. Jedna kapitola se přímo zabývá těmito systémy.

V dalších kapitolách je popsán návrh takového systému a také možnosti jeho řízení.

V poslední kapitole je popsáno praktické měření v laboratoři palivových článků na VŠB TU Ostrava. Jednalo se o měření na přibližně stejném zařízení, které jsou popsány v kapitole již pracujících systémů. V tomto případě probíhalo měření v laboratorních podmínkách a pouze při slunečném počasí. Také instalovaný výkon jednotlivých komponent se poněkud lišil. Ale pomocí tohoto měření jsem měl možnost lépe pochopit chod takového systému a tyto znalosti mi posloužily i pro pochopení chodu větších hybridních zařízení.

Nasazení takových systémů je do budoucna perspektivní, především pro vzdálené objekty, které nejsou, nebo nemají možnost připojení na veřejnou distribuční síť. Vzhledem k tomu, že některé již hotové projekty pracují v oblastech severnějších než je Česká Republika, je možnost takového využití možná i v našich podmínkách. Ale vzhledem k našim geografické poloze musí projekty být kvalitně zpracovány a brát v úvahu převážně velké množství oblačných dnů. Moderní polykrystalické nebo tenkovrstvé panely však dneska dokáží pracovat s dobrou účinností i při horších světelných podmínkách a využít velký podíl difúzního záření.

Celkově mi tvorba diplomové práce přinesla mnoho nových znalostí o fungování takových zařízení, ať už pracujících v bivalentním provozu nebo samostatně.

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Energetická náročnost výroby fotovoltaických panelů	20
Tabulka 2 – Potřebná plocha pro výrobu 1 kWp pro různé technologie [28]	22
Tabulka 3 – Parametry elektrolyzéru systému SAPHYS.....	34
Tabulka 4 – Parametry palivového článku systému SAPHYS.....	35
Tabulka 5 – Parametry alkalického elektrolyzéru systému PHOEBUS.....	39
Tabulka 6 – Parametry palivového článku systému PHOEBUS.....	39
Tabulka 7 – Porovnání parametrů po 11 letech (SCHATZ)	40
Tabulka 8 – Parametry systému HARI	43
Tabulka 9 – Příklad výpočtu denní spotřeby	55
Tabulka 10 – Průměrné denní globální záření pro Ostravu.....	55
Tabulka 11 – České a Anglické označení termů	61
Tabulka 12 – Výsledky první části měření.....	66
Tabulka 13 – Výsledky druhé části měření	68

Seznam obrázků

Obr. 1 Elektromagnetické spektrum.....	9
Obr. 2 Porovnání velikosti dostupných energií s energií slunečního záření [33].....	9
Obr. 3 Poměr difúzního a přímého záření (nahore) a sluneční mapa ČR (dole) [34]	11
Obr. 4 Solární konstanta.....	11
Obr. 5 Pásy energií v polovodiči.....	13
Obr. 6 Model PN přechodu	14
Obr. 7 Fotovoltaický článek.....	15
Obr. 8 Náhradní obvod fotovoltaického článku.....	16
Obr. 9 VA charakteristika (nahore) a výkonová charakteristika (dole)	17
Obr. 10 Vlivy odporů na VA charakteristiku.....	19
Obr. 11 Konstrukce fotovoltaického panelu.....	20
Obr. 12 Popis funkce palivového článku.....	23
Obr. 13 Grafické rozdělení palivových článků	25
Obr. 14 Polarizační charakteristika palivového článku.....	31
Obr. 15 Výkonová charakteristika palivového článku	32
Obr. 16 Vliv teploty a tlaku na polarizační charakteristiku.....	32
Obr. 17 Denní charakteristiky komponent systému SAPHYS.....	36
Obr. 18 Schéma systému PHOEBUS.....	37
Obr. 19 Rozšíření systému PHOEBUS.....	39
Obr. 20 Schéma systému HARI	42
Obr. 21 Schéma bivalentního systému.....	44
Obr. 22 Sluneční mapy ČR [www.chmi.cz].....	45
Obr. 23 Vliv orientace a sklonu na energetický výnos.....	46
Obr. 24 Systém Traxle	47
Obr. 25 Porovnání statického a pohyblivého solárního panelu.....	47
Obr. 26 Použití koncentrátorů a systému Traxle.....	48
Obr. 27 Porovnání statického panelu s panelem vybaveným koncentrátorem a systémem Traxle	48
Obr. 28 Možnosti instalace fotovoltaických panelů.....	49
Obr. 29 Popis funkce elektrolyzéru PEM.....	52
Obr. 30 Denní charakteristika hybridního systému pro slunečný den.....	59
Obr. 31 Denní charakteristika hybridního systému pro oblačný den	59
Obr. 32 Struktura fuzzy regulátoru.	62
Obr. 33 Závislost tlaku a množství vyrobeného vodíku.....	66
Obr. 34 Špičkové odběry elektrolyzérů.....	67

Literatura

- [1] EG&G Technical Services, Inc. *Fuel cell handbook : Seventh Edition*. USA : U.S. Department of Energy, 2004. 427 s.
- [2] MARKVART, Tom ; CASTAÑER, Luis. *Practical handbook of Photovoltaic : Fundamentals and Applications*. Oxford, Velká Británie : Elsevier, 2003. 984 s. ISBN 1856173909
- [3] ŘEHÁK, Jaromír; BÁRTEK, Jiří ; BAŘINKA, Radim. *Fotovoltaika a fotovoltaické systémy v podmínkách ČR a jejich navrhování*. Rožnov pod Radhoštěm : Česká energetická agentura. 61 s. Dostupné z WWW: <www.mpo-efekt.cz/dokument/98_8050.pdf>.
- [4] LIBRA, Martin ; POLULEK, Vladislav. *Fotovoltaika : teorie i praxe využití solární energie* . 1. vyd. . Praha : ILSA, 2009. 160 s. ISBN 978-80-904311-0-2.
- [5] Srinivasan. *Fuel cells : from fundamentals to applications*. New York : Springer , 2006 . 691 s. ISBN 0-387-25116-2.
- [6] LIMBERK, Ondřej . ČEZ [online]. 2009 [cit. 2011-05-06]. Dostupné z WWW: <<http://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/10-limberk.pdf>>.
- [7] EMONTS, Bernd; JANßEN, Holger; STOLTEN, Detlef. *Jülich forschungszentrum* [online]. Německo : 2008 [cit. 2011-05-06]. 10 Jahre PHOEBUS-Projekt. Dostupné z WWW: <http://www.now-gmbh.de/uploads/media/14__Emonts__FZ_Juelich__10_Jahre_Phoebus-Projekt.pdf>.
- [8] REIS, A.M., et al. Comparison of PV module performance before and after 11-years of field exposure. In *Proceedings of the 29th IEEE Photovoltaics Specialists Conference New Orleans* [online]. Louisiana : 2002 [cit. 2011-05-03]. Dostupné z WWW: <<http://humboldt-dspace.calstate.edu/xmlui/bitstream/handle/2148/44/PV%20Performance%202002IEEE.pdf?sequence=1>>.
- [9] GAMMON, Rupert, et al. Hydrogen and renewables integration (HARI) [online]. Loughborough University UK : Centre of renewable energy systems technology, 2001 [cit. 2011-05-03]. Dostupné z WWW: <<http://ieahia.org/pdfs/HARI.pdf>>.
- [10] SCHUCAN, T. SAPHYS: STAND-ALONE SMALL SIZE PHOTOVOLTAIC HYDROGEN ENERGY SYSTEM . In *Case Studies of Integrated Hydrogen Energy Systems* . Switzerland : Paul Scherrer Institute, 1997. s. 13.
- [11] MUERER, C. ; BARTHELS, H.; BROCKE, W.A. PHOEBUS : an autonomous supply system with renewable energy: six years of operational experience and advanced concepts. In *Solar Energy : Volume 67* [online]. Germany : Elsevier, 1999, 2000 [cit. 2011-05-03]. Dostupné z WWW: <<http://www.sciencedirect.com>>
- [12] *Schatz Energy Research Center (SERC)* [online]. 2011 [cit. 2011-2-3]. Dostupné z WWW: <<http://www.schatzlab.org>>.

- [13] Rutgers [online]. 12 [cit. 2011-04-03]. Describing a fuel cell's performance and efficiency. Dostupné z WWW: <<http://policy.rutgers.edu/ceeep/hydrogen/education/ThermodynamicsFuelCells.pdf>>.
- [14] Solar cell. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, , last modified on 3 května 2011 [cit. 2011-05-03]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell>.
- [15] Palivový článek. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, , last modified on 19. 4. 2011 [cit. 2011-05-03]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Palivov%C3%BD_%C4%8Dl%C3%A1nek>.
- [16] SOKANSKÝ, K. *Palivové články v energetice*. Ostrava, 152 s.
- [17] Nexa® Educational Packages [Online]
< http://www.event.hfpeurope.org/exhibition/specs/Heliocentris_Nexa_-_Specs.pdf>
- [18] Ballard Power Systems - PEM Fuel Cell [Online]
<<http://www.energysolutionscenter.org/DistGen/AppGuide/Manf/BallardPEM.htm>>
- [19] Manuály produktů SMA Solar Technology. <<http://www.sma.de>>
- [20] KARAMANOLIS , Stratis. *Sluneční energie : východisko z ekologicko-energetické krize*. Praha : Sdružení MAC , 1996. 238 s. ISBN 80-86015-02-5.
- [21] Česká agentura pro obnovitelné zdroje energie [online]. [cit. 2011-05-03]. Fotovoltaika pro každého. Dostupné z WWW: <<http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika>>.
- [22] Proton energy [online]. [cit. 2011-04-30]. HOGEN® GC Technical Specifications. Dostupné z WWW: <http://www.protonenergy.com/backend/arc_contenido/archivo49.pdf>.
- [23] *Scientific & Technical reference on renewable energy and end-use energy efficiency* [online]. [cit. 2011-02-08]. Dostupné z WWW: <<http://re.jrc.ec.europa.eu/refsys/>>.
- [24] H2WEB [online]. [cit. 2011-02-08]. Dostupné z WWW: <<http://vodik.czweb.org>>.
- [25] BAČA, Petr. *TZB-info* [online]. 2011 [cit. 2011-02-6]. Akumulace energie z OZE - vodíkové hospodářství. Dostupné z WWW: <<http://energie.tzb-info.cz/7134-akumulace-energie-z-oze-vodikove-hospodarstvi>>.
- [26] TRAXLE [online]. 2011 [cit. 2011-02-11]. Solární panely, solární systémy. Dostupné z WWW: <<http://www.solar-trackers.com>>.
- [27] KLECZEK, Josip. *TZB-info* [online]. 2004 [cit. 2011-05-04]. Solární panely, solární systémy. Dostupné z WWW: <<http://www.tzb-info.cz/1948-slunce-a-jeho-energie>>.
- [28] Solaren s.r.o. [online]. [cit. 2011-05-04]. Dostupné z WWW: <<http://www.solarni-systemy.eu>>.
- [29] Solarnibaterie.cz [online]. [cit. 2011-05-04]. Dostupné z WWW: <<http://www.solarnibaterie.cz>>.
- [30] Solarenvi [online]. [cit. 2011-05-04]. Dostupné z WWW: <<http://www.solarenvi.cz>>.
- [31] Heliocentris energy solution AG [online]. [cit. 2011-05-04]. Dostupné z WWW: <<http://www.heliocentris.com>>.

- [32] Elektromagnetické spektrum. In *Wikipedia : the free encyclopedia*[online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, [cit. 2011-05-04]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetick%C3%A9_spektrum>.
- [33] „Energetická krychle“ [online] [cit. 2010-03-06]. Dostupný z WWW: <http://www.bramac.cz/fileadmin/rootBramac/bramac_czech/Produkte/Bilder/Solar/slunecni_energie.jpg>
- [34] *Přímé a difuzní záření* [online] [cit. 2010-03-06]. Dostupný z WWW: <<http://www.elektřinazestřechy.cz/Fotovoltaika.aspx>>.
- [35] MODRLÁK, Osvald. *Teorie automatického řízení II. : FUZZY ŘÍZENÍ A REGULACE*. Liberec : TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI, 2004. 27 s. Dostupné z WWW: <www.fm.tul.cz/~krtsb/fm/tr2/tar2_fuz.pdf>.
- [36] EL-SHATTER, Thanaa F.; ESKANDER, Mona N.; EL-HAGRY, Mohsen T. Energy flow and management of a hybrid wind/PV/fuel cell generation system. [online]. Egypt : 2005 [cit. 2011-04-04].

Přílohy